

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Numerická simulace svařování vysokouhlíkové oceli
zpracované SPD procesem

Numerical Simulation of Welding High Carbon Steel
After SPD Process

Student: Bc. Pavel Boxan
Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Boxan**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Numerická simulace svařování vysokouhlíkové oceli zpracované SPD
procesem
Numerical Simulation of Welding High Carbon Steel After SPD Process

Zásady pro vypracování:

1. Charakterizujte použité materiály a technologie.
2. Navrhněte numerický model pro svařování technologií 141-GTAW.
3. Proveďte numerickou simulaci technologie SPD vysokouhlíkové oceli.
4. Proveďte numerickou simulaci technologie svařování vysokouhlíkové oceli.
5. Výsledky dosažené numerickou simulací porovnejte s experimentem.
6. Proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
HRIVŇÁK, I. *Teoria zvaritelnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.
OCHODEK, V., RUSZ, S. Evolution of residual stresses in the steel strip after DRECE technology, *COMAT 2012*, 2nd International Conference on Recent Trends in Structural Materials, Nov 21st - 22nd, Tanger s.r.o., Plzeň, Czech Republic, ISBN 978-80-87294-34-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2015



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3.).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2015



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Pavel Boxan

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hraniční 40/3; 793 42 Janovice u Rýmařova

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BOXAN, P. *Numerická simulace svařování vysokouhlíkové oceli zpracované SPD procesem : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 74 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá numerickou simulací protlačování plechu z vysokouhlíkové oceli nástrojem DRECE v programu Simufact.forming, po kterém následuje numerická simulace svařování elektrickým obloukem, takto zpracovaného plechu, v programu Simufact.welding. Vliv jednotlivých průchodů plechu přes nástroj DRECE je hodnocen na základě dosažených hodnot intenzity napětí a intenzity deformace. Důsledek svařovacího procesu je hodnocen na základě velikosti zbytkového napětí a tvrdosti ve svaru a výsledná data byla následně verifikována s experimentem. Výsledkem této práce je studie proveditelnosti simulovaných procesů a jejich porovnání s experimenty.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BOXAN, P. *Numerical Simulation of Welding High Carbon Steel After SPD Process : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2015, 74 p. Thesis head: Ochodek, V.

This master thesis deals with numerical simulation of high carbon steel sheet extrusion by DRECE equipment using a Simufact.forming software and subsequently with arc welding numerical simulation of extruded sheets using a Simufact.welding software. Effects of sheet passes through DRECE equipment material properties are evaluated on the basis of obtained stress intensity and deformation intensity values. Consequence of the welding process is evaluated on the basis of residual stress and weld joint hardness values. Then these values are verified by experiment. The thesis result is feasibility verification of simulated processes and their comparison with experiments.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	8
0. Úvod.....	9
1. Přehled programů vhodných pro numerické simulování tvářecích procesů	11
1.2 Qform	12
1.2 FormFEM	13
1.3 Simufact.forming.....	14
2. Přehled programů vhodných pro numerické simulování svařování	16
2.1 SYSWELD	17
2.2 VrWeld	18
2.3 Simufact.welding.....	19
3. Charakteristika simulovaných procesů	22
3.1 Zařízení DRECE	22
3.1.1 Důsledek vícenásobné plastické deformace	24
3.2 Svařování TIG	26
3.2.1 Pulzní režim svařování TIG.....	27
4. Charakteristika použitých materiálů při simulacích	28
4.1 Materiál tvářecích nástrojů v zařízení DRECE	28
4.2 Materiál zpracovávaného materiálu	29
4.2.1 Charakteristika vybraného materiálu pro zpracování	30
4.3 Svařitelnost oceli C55E zpracované SPD procesem	32
5. Matematická simulace procesu protlačování pásu plechu	33
5.1 Vložená geometrie.....	33
5.2 Zadané vstupní parametry pro simulaci DRECE zařízení	35

5.3 Volba sítě konečných prvků	35
5.4 Pokročilé nastavení procesu	36
5.5 Výsledky vícenásobné plastické deformace	37
5.5.1 Velikost intenzity deformace a intenzity napětí při použití síťování SHEETMESH	38
5.5.2 Velikost intenzity deformace a intenzity napětí při použití síťování slMeshTetra	44
5.6 Vyhodnocení simulace zpracování plechu v DRECE zařízení	48
6. Matematická simulaci procesu svařování pásu plechu upraveného DRECE zařízením ..	49
6.1 Parametry svařování na reálných vzorcích	50
6.2 Vstupní parametry pro simulaci svařování	52
6.3 Výsledky simulace svařování	57
6.3.1 Teplotní analýza	57
6.3.2 Napětíová analýza	58
6.3.3 Strukturní analýza	62
6.4 Vyhodnocení simulací svařování	63
7. Verifikace výsledků simulací s experimentem	64
7.1 Zbytkové napětí	64
7.2 Šířka teplem ovlivněné oblasti a mikrostruktura svaru	65
7.3 Měření mikrotvrdosti	66
8. Diskuze dosažených výsledků	67
9. Závěr	69
10. Seznam použité literatury	71
11. Seznam příloh	74

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Význam
A_{80mm}	[%]	Tažnost
Ac_1	[°C]	Eutektoidní přímka
Ac_3	[°C]	Teplota přeměny austenitu na ferit
CONFORM	-	Continuous Extrusion Forming
CPIT	-	Centrum pokročilých inovačních technologií
DRECE	-	Dual Rolling Equal Channel Extrusion
ECAP	-	Equal Channel Angular pressing
FEM	-	Metoda konečných elementů (Finite Element Method)
FVM	-	Metoda konečných objemů (Finite Volume Method)
GTI	-	Goldak Technologies Inc.
HV	-	Tvrdost dle Vickerse
PTM	-	Pravé tlačítko myši
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu při protažení o 0,2%
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
TIG	-	Tungsten Inert Gas
TOO	-	Tepelně ovlivněný materiál
UFG	-	Ultrajemnozrné (ultra fine grained)
ZP	-	Zpracovávaný plech
ϵ_{max}	-	Maximální intenzita deformace
σ_x	[MPa]	Napětí v ose X
σ_z	[MPa]	Napětí v ose Z
σ_{max}	[MPa]	Maximální intenzita napětí

0. Úvod

Rozvoj materiálu zpracovaných vícenásobnou plastickou deformací (Severe Plastic Deformation, SPD) byl odstartován poznatkem, že pevnost materiálu roste s klesající velikostí zrna. Hlavní výzkum výroby UFG materiálů byl započat v 80. letech 20 století na institutu v Minsku, jehož výsledkem byla vynalezení metody ECAP. Při ní je polotovar ve formě hranolu protlačován zalomeným kanálem o stejném průřezu jako polotovar. Od té doby byla vynalezena řada SPD metod umožňující kontinuální zpracování polotovaru. Mezi ně patří i technologie CONFORM (Continuous Extrusion Forming), umožňující kontinuální zpracování plechů v libovolných délkách.

Na vývoji tvorby UFG materiálů se podílí také VŠB-TU Ostrava, která vlastní dva prototypy zařízení DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion). První prototyp slouží pro protlačování pásů plechů a druhý pro protlačování drátů. Tyto prototypy vznikly právě modifikací technologie CONFORM a jsou umístěna na pracovišti CPIT Katedry mechanické technologie.

Postup výroby UFG materiálů je založen na dislokačním zpevnění za využití čistého smyku, při kterém dojde ke zjemnění krystalické struktury a zmenšení zrn kovů na velikost od 1 do 100nm. Díky velikosti získaného zjemnění bývají UFG materiály označovány také jako nanomateriály. Takto upravené materiály (v závislosti na druhu materiálu polotovaru) zvýší své pevnostní a únavové vlastnosti, tvrdost, korozní odolnost a odolnost proti opotřebení. Nejčastěji upravované materiály jsou slitiny titanu, hliníku nebo mědi. Úpravou materiálu na UFG materiál se však sníží plastické vlastnosti. To je dáno zmenšením poměru hodnot pevnosti R_m k R_e . Z tohoto důvodu není vhodné používat UFG materiály pro následné tvářecí procesy, jakými je lisování či hluboké tažení.

Polotovarem pro zpracování plechů v zařízení DRECE je plech o maximální šířce 60 mm a tloušťce 2mm. Tyto rozměry mohou být v některých aplikacích limitem použitelnosti upraveného materiálu. Zmíněný aspekt byl důvodem k najetí vhodného druhu spojení plechů. Tento druh spojení by měl zaručit v co nejmenší míře ovlivnění získaných vlastností. Mezi takové metody můžeme zařadit určité způsoby svařování, které limitují teplem ovlivněnou oblast do co nejúžší šířky.

K ověření důsledků svařovacího cyklu lze použít v dnešní době rozšířené simulační softwary, jež jsou založené na numerických modelech výpočtů metodou konečných prvků. Tato práce se zabývá právě touto problematikou, přičemž navazuje na bakalářskou práci na téma „*Hodnocení vybraných vlastností svarového spoje nízkouhlíkové oceli zpracované vícenásobnou plastickou deformací*“ [7]. Zpracovaný materiál je nejprve zpracován v programu Simufact.forming pro simulování tvářecích operací a následně převeden do programu Simufact.welding umožňující simulaci svařovacích procesů. Výsledky těchto simulací jsou v závěru práce rozebrány.

1. Přehled programů vhodných pro numerické simulování tvářecích procesů

Důvodem zavedení simulačního programu v podniku je zvýšení kvality výrobků a snižování nákladů vložených do technologické přípravy výroby. Výsledkem je tedy efektivnější příprava výroby a zvýšení konkurenceschopnosti podniku. Simulace tvářecích procesů umožňují ověřovat navrhnuté geometrie nástrojů a zjišťovat jejich opotřebení, sledovat toky materiálů a chování intenzity deformací a intenzity napětí materiálu a dalších vlastností. Díky tomu není v určitých případech zapotřebí ověřování konstrukce experimenty, ale můžeme postupovat od návrhu konstrukce, přes ověření pomocí simulačního programu k samotné výrobě nástrojů k tváření.

Simulační nástroje nám dovolují analyzovat velmi složité tvářecí operace, které jsou běžnými analytickými metodami neřešitelné nebo se řeší velmi komplikovaným způsobem a zjednodušením. Jsou založené na modelaci technologických procesů plastické deformace na principu FEM nebo FVM.

Simulace tváření dávají představu o:

- Směru toku materiálu
- Vzniku defektů
- Rozložení teploty polotovaru a nástrojů
- Zatížení stroje
- Změně mechanických vlastností materiálu

Simulace tváření pomáhají:

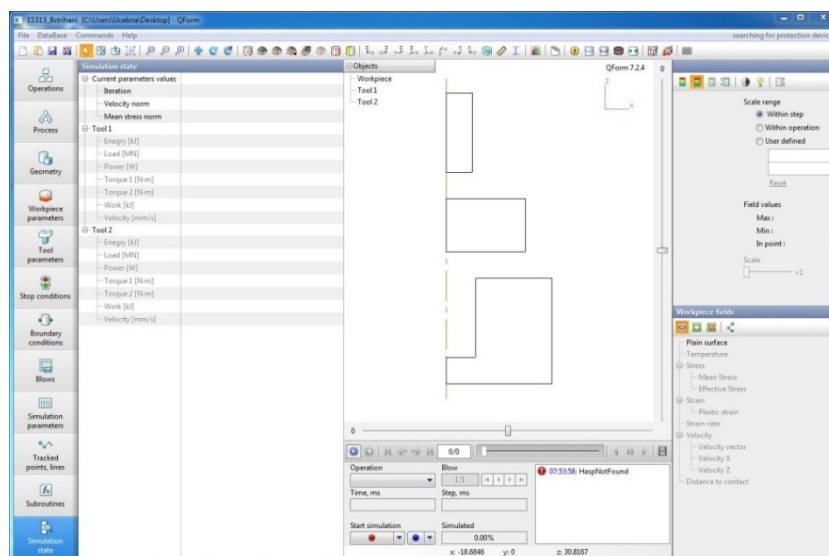
- Vybrat vhodný rozměr polotovaru
- Vybrat vhodný stroj s dostatečným výkonem
- Optimalizovat tvary nástrojů
- Vybrat vhodnou tvářecí teplotu
- Vybrat vhodné mazivo
- Analyzovat napětí v nástroji

V dnešní době již existuje mnoho programů pro numerické simulování tvářecích procesů, které se mezi sebou mohou lišit množstvím podporovaných procesů, metodou

analýzy materiálových modelů, množstvím materiálů obsažených v knihovně materiálů, počtem analyzovaných charakteristik, přívětivostí pro uživatele a intuitivností ovládání. V následujících kapitolách budou představeny nejpoužívanější tvářecí programy, jejichž licence vlastní i VŠB-TU Ostrava na Katedře mechanické technologie (QForm, FormFEM, Simufact.forming).

1.2 Qform

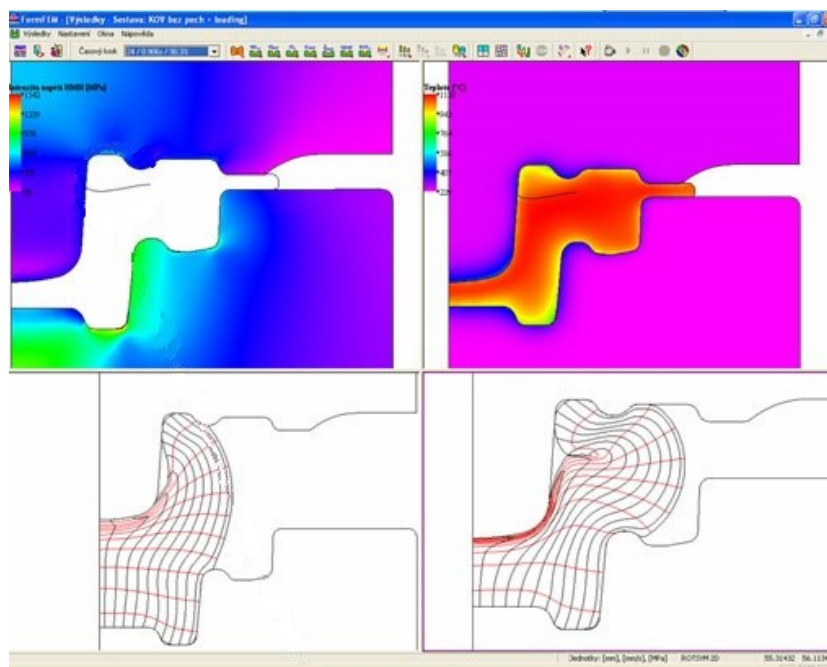
Simulační program QForm vyvíjí společnost QuantorForm od roku 2002. Slouží pro simulaci objemových i plošných procesů tváření ve 2D i 3D prostoru za využití výpočtů metodou konečných prvků FEM. Práce s programem je velmi jednoduchá díky nutnosti vložení minima informací. Sít prvků typu QUADRADIC se vkládá automaticky a velikost prvků závisí na složitosti geometrie. Složitě geometrie obsahují jemnější síť prvků a zbytek polotovaru obsahuje hrubší síť prvků. Díky tomu významně klesá čas potřebný k simulaci. Geometrie nástrojů a polotovarů se vkládají ve formátu IGES nebo STEP. Tím se zaručí zamezení ztrát přenosu dat informací o geometriích typických pro formáty jako STL. Program také obsahuje modul pro tvorbu jednoduchých geometrií. Výsledky simulací jsou zobrazovány průběžně s vypočítávanou simulací. Tento program dovoluje simulaci tepelného zpracování, tváření za tepla i za studena, volného kování, válcování, vytlačování a dalších metod tváření.



Obrázek 1 – Prostředí programu Qform7

1.2 FormFEM

Program FormFEM vyvíjí česká firma ITA s.r.o. se sídlem v Ostravě. Program slouží k simulaci plošného a objemového tváření za tepla i za studena pouze ve 2D prostoru. Tím je jeho použitelnost ohraničena na analyzování rovinných nebo rotačně symetrických těles. Program kromě běžných charakteristik dokáže analyzovat elastickou napjatost a deformaci nástrojů. Pro analýzu využívá tuhoplastický materiálový model a podmínku nestlačitelnosti. Ta je splněna použitím metody Langeových multiplikátorů. V analýze využívá tři modely tření (adhezivní, Coulombovský, kombinovaný). Pro vkládání geometrie do procesu slouží kreslicí editor nebo importování souboru ve formátu DXF. Pro predikci mechanických vlastností po tepelném zpracování je nutné vlastnit program TTSteel.

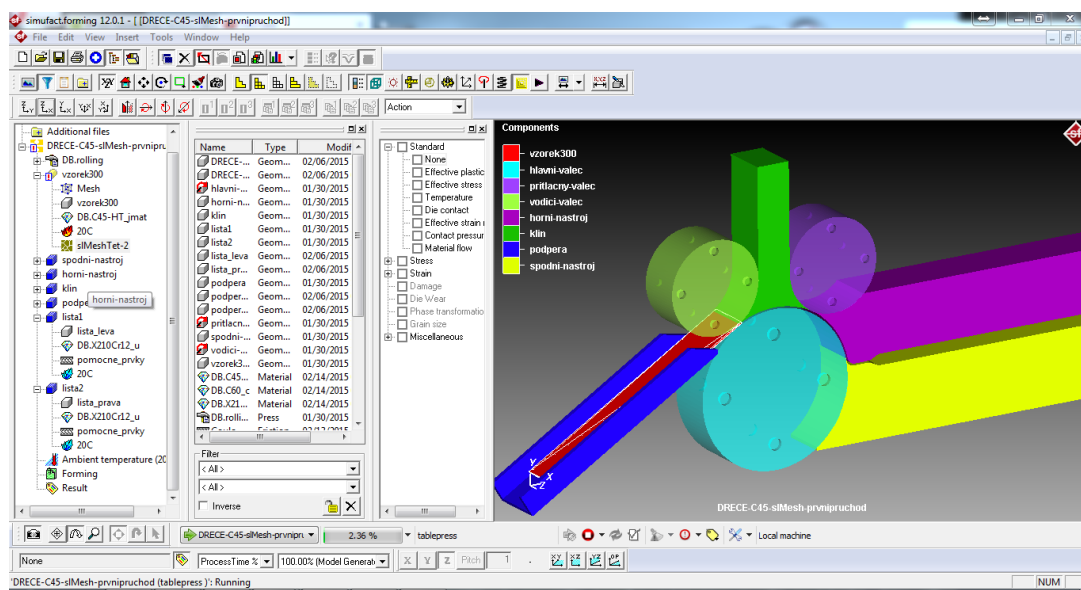


Obrázek 2 – Prostředí programu FormFEM [18]

1.3 Simufact.forming

Simulační program Simufact.forming vznikl roku 2007 spojením do té doby dvou oddělených programů MSC.SuperForm a MSC.SuperForge ve firmě Femutec sídlící v Hamburku, která v roce 2008 změnila svoje jméno na Simufact Engineering. Systém výpočtu je založen na metodě konečných prvků (FEM) nebo metodě konečných objemů (FVM), přičemž použití metody konečných objemů zvyšuje rychlost výpočtu až desetkrát. Pro jednotlivé tvářecí operace nabízí program oddělené specializované moduly pro daný typ zpracování, ty mohou být:

- Zápustkové a volné kování (za tepla i za studena)
- Lisování
- Válcování kruhové, ploch, profilů
- Ohýbání
- Dopředné a zpětné protlačování
- Pěchování
- Stříhání
- Ohřev a ochlazování
- Vytlačování
- Analýzu nástrojů



Obrázek 3 – Prostředí programu Simufact.forming

Jednou z hlavních předností tohoto programu je jeho provázanost s programem Simufact.welding umožňující simulovat na jednom výrobku svařovací procesy a následné tvářecí procesy nebo naopak.

Pro provedení analýzy procesu je nutné vložit do programu Simufact.forming vstupní data, přičemž se jedná se o informace:

- Způsobu tváření a rozmezí teplot, které jej charakterizují (za tepla, za studena)
- Geometrie nástrojů (vložená v libovolném běžném formátu CAD systémů přičemž nejověřenější formáty jsou STEP nebo IGES)
- Použité materiály (v knihovně materiálů se nalézají materiály s popsány materiálovými vlastnostmi pro studené zpracování a pro práci za tepla, svařování a několik materiálů z převzatých materiálových databází MatILDa a JMatPro, které jsou kompletně popsány pro celé spektrum dosažitelných teplot)
- Použitý stroj a jeho parametry (buchar, hydraulický, klikový nebo výstředníkový lis)
- Součinitel tření (coulombovský, kombinovaný nebo lineární model tření)
- Parametry výměny tepla
- Vložení sítě do polotovaru a nastavení parametrů přestavby sítě

Simulací získáme data o:

- Intenzitě napětí
- Intenzitě deformace
- Opotřebení nástrojů
- Změně strukturních fází v materiálu
- Velikosti zrna
- Rychlosti toku materiálu
- Změně teploty v polotovaru a v nástrojích
- Vzájemném kontaktu polotovaru s nástroji
- Pohybu bodů v polotovaru

2. Přehled programů vhodných pro numerické simulování svařování

Počítačové programy pro numerické simulování procesů svařování přinášejí uživatelům prostředek pro zvýšení kvality produkovaných výrobků, snížení nákladů a omezují provádění experimentů pouze pro nutné případy vyhotovení certifikačních ověření. Využití výpočetní techniky umožňuje optimalizaci technologického postupu, ověření svařovacích parametrů (svařovací proud, napětí, rychlost svařování, síla a druh upnutí) a jejich vzájemného sladění tak, aby výsledný produkt v realizační části odpovídal na něj kladeným požadavkům. Díky tomu zamezíme vzniku nepřipustných vad, jako jsou přílišné deformace svařence, trhliny ve svarovém spoji a v teplem ovlivněné oblasti (TOO) nebo vznik nevhodných materiálových struktur. Pro analýzu tyto programy využívají metodu konečných prvků.

Numerické simulace svařování dokáží predikovat:

- rozložení teplotních polí
- velikost teplem ovlivněné oblasti
- materiálové struktury ve svaru a TOO (ferit, perlit, austenit, martenzit, bainit)
- zbytkové napětí a vznik deformací
- tvrdost v jednotkách HV

Analýza výsledků simulace nám pomůže při volbě technologie svařování a materiálů, optimalizaci svařovacích parametrů, volbě přehřevu, určení tuhosti svařovacích přípravků, určení nutnosti změny konstrukce svařence, pro zamezení vytvoření nežádoucích struktur a určení zbytkového napětí v svařenci po svařování.

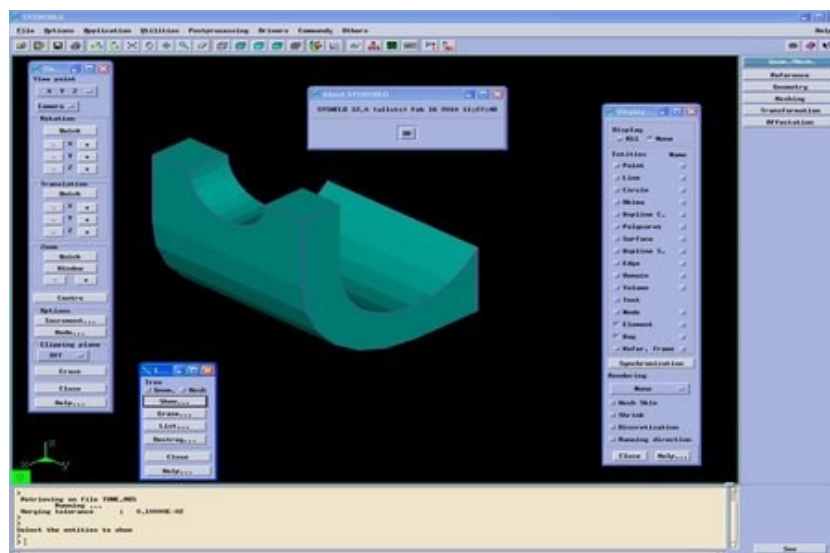
Simulaci svařovacích procesů lze provést univerzálními simulačními nástroji jako je Ansys nebo Abaqus. Ty mají ovšem nedostatky v přílišné všeobecnosti a neobsahují moduly pro nastavení zdrojů tepla. Vhodnější jsou specializované nástroje pro numerické simulace svařování jako je Simufact.welding, VrWeld nebo soustava nástrojů od společnosti ESI Group (SYSWELD, VISUAL WELD, VISUAL Heat Treatment, PAM Assembly a Weld Planner) s různými možnostmi použití. Pro komplexní simulaci svařování umožňující analýzu všech důležitých materiálových charakteristik jsou použitelné pouze programy SYSWELD, VrWeld a Simufact.welding. Ty jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1 SYSWELD

Simulační software SYSWELD vyvíjí francouzská vývojářská společnost ESI Group. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších a nejdokonalejších simulačních programů svařovacích procesů. Dokáže simulovat většinu komerčně používaných metod svařování.

Numerická analýza svařování je řešena pomocí transientní analýzy. Ta je rozdělena na teplotně-metalurgickou a mechanickou část. Teplotně-metalurgická část umožňuje výpočet nestacionárních teplotních polí v prostoru a čase, zjištění rozložení jednotlivých fází v průběhu celého svařovacího procesu, výpočet tvrdosti struktur a velikost autentického zrna. Po teplotním zatížení soustavy následuje mechanická část, která nám dává představu o časových průbězích jednotlivých složek tenzoru napětí a tenzoru deformace, hodnot hlavních napětí, průbězích pružných a plastických deformací v závislosti na čase a posunutí jednotlivých uzlových bodů. Analýzu prostorového stavu napjatosti vypočítává dle HMM a Trescovy analýzy smykových napětí. [12]

V porovnání s programem Simufact.welding nedokáže spolupracovat s jinými programy pro simulování tvářecích programů.



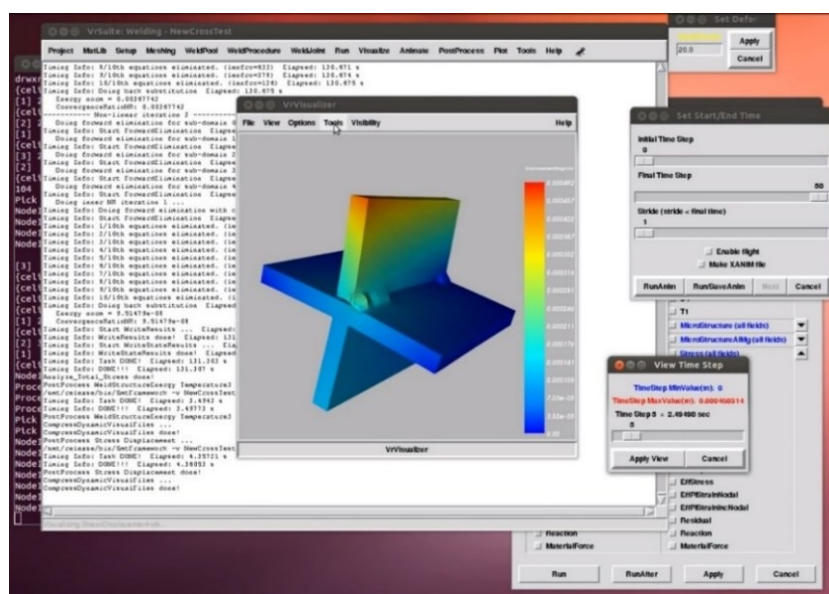
Obrázek 4 – Prostředí programu SYSWELD

2.2 VrWeld

Za vývojem tohoto simulačního softwaru stojí kanadská firma Goldak Technologies Inc. (GTI) sídlící v Ottawě založená a stále vedená Johnem Goldakem. Program je využíván při opravě svarů ponorek pro kanadské námořnictvo a ve výrobcích pro jadernou energetiku. Program je založen na výpočtu FEM pomocí transient analýzy, která se skládá ze dvou částí:

- Tepelná a mikrostrukturální analýza (velikost teplotních polí, rozložení fází, velikost zrna a tvrdost vzniklých struktur)
- Mechanická a strukturní analýza (velikost napětí a deformace)

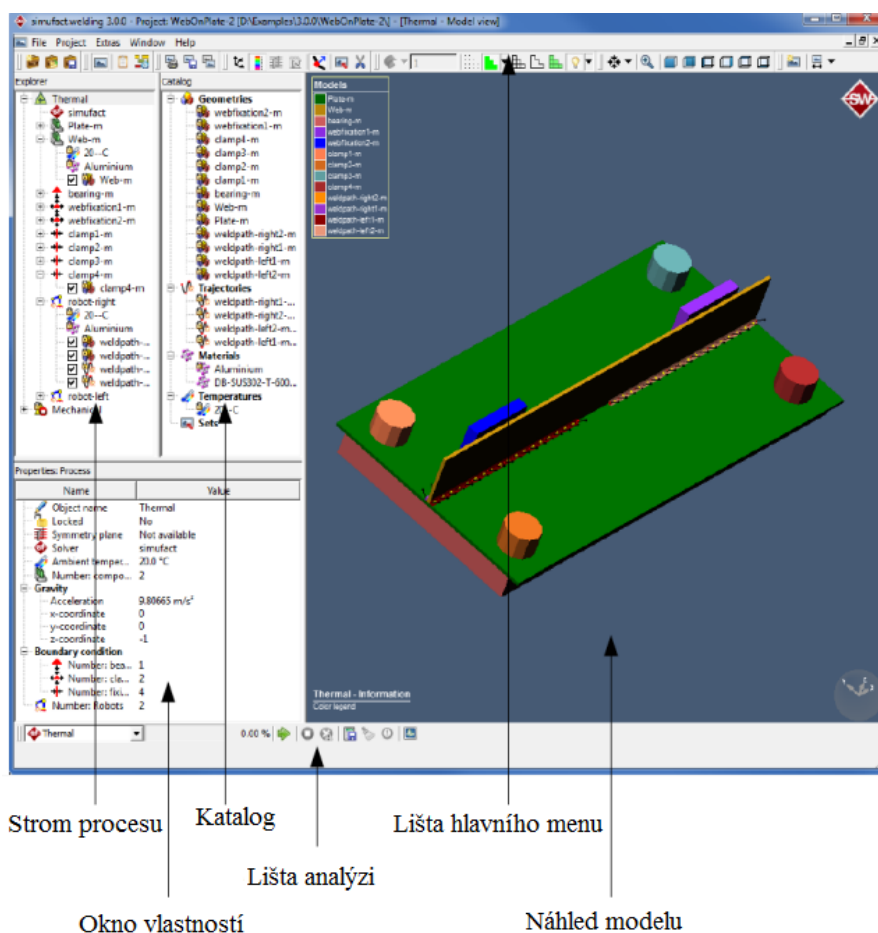
Program dokáže predikovat 3D teplotní pole, vývoj mikrostruktur, vznik napětí a deformace a další vlastnosti. Dokáže zvýraznit úroveň dosažených deformací tím, že je vizuálně znásobí. Tím se zlepší přehlednost vzniklých deformací v celé konstrukci. Pro model zdroje tepla je využíván dvoj-elipsoid vytvořený právě Johnem Goldakem, a který je využívaným modelem ve většině simulačních programech, jako zdroj tepla při obloukovém svařování. Geometrie prvků se vkládá ve formátu STL. [3,17]



Obrázek 5 – Prostředí programu VrWeld [17]

2.3 Simufact.welding

Simufact.welding je software pro numerické simulování svařovacích procesů využívající metodu konečných prvků. Vytváří jej společnost Simufact Engineering GmbH se sídlem v německém Hamburku. Je vhodný pro jednoduché i složité svařence obsahující více svarů s různou geometrií, přičemž svary mohou být tupé i koutové. Dovoluje simulaci svařování při použití více svařovacích zdrojů současně, přičemž výpočet probíhá postupně dle nastaveného časového sledu jednotlivých operací.



Obrázek 6 – Prostředí programu Simufact.welding

Program je založen na elasticko-plastickém chování materiálu. Je postaven na modulárním principu a k řešení využívá dva typy solveru - Simufact solver a Weldsim solver.

Simufact solver

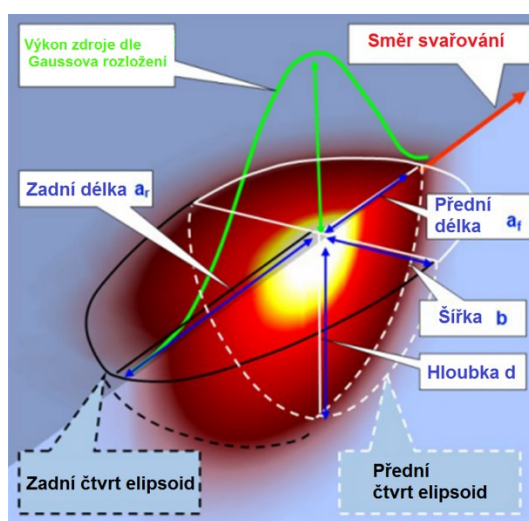
Simufact solver řeší teplotní a mechanické vazby v daný okamžik současně. Výpočet probíhá při velmi malých časových krocích a tím dochází k vzrůstu času potřebného pro simulaci.

Weldsim solver

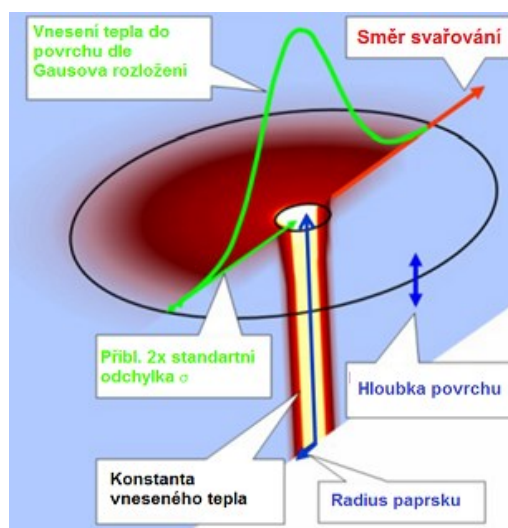
Řešitel Weldsim solver dokáže od sebe oddělit teplotní a mechanické vazby a použít pro ně odlišné časové kroky. Tím dojde k významnému snížení výpočtového času.

Program dokáže simulovat dva druhy zdroje tepla:

- Svařování se zdrojem tepla vznikajícím při hoření elektrického oblouku, popsatelným dle Goldakova modelu dvojího elipsoidu. Ten je definován délkou předního a zadního elipsoidu, a šířkou a hloubkou elipsoidu.
- Svařování laserovým nebo elektronovým svařováním s koncentrovaným zdrojem tepla do jednoho bodu o daném průměru a hloubce protavení materiálu.



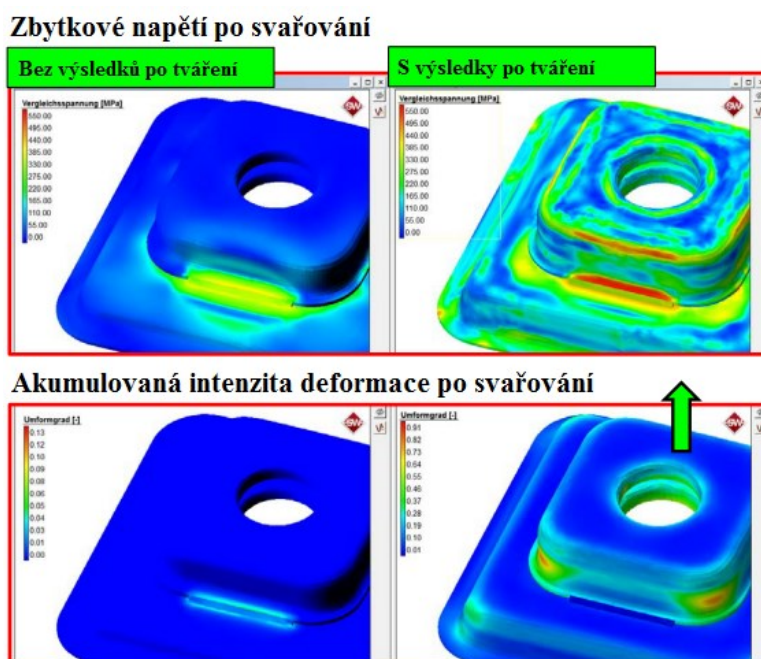
Obrázek 7 – Goldakův model zdroje tepla pro svařování elektrickým obloukem [9]



Obrázek 8 - Zdroj tepla pro laserové/elektronové svařování [9]

Zjemnění sítě prvků v oblasti zdroje tepla, které je nutné pro dosažení přesnějších výsledků, probíhá automaticky v průběhu analýzy. Definuje se stupněm zjemnění a oblastí zjemnění. Může být volena v závislosti na rozměrech tavné lázně, teplotním gradientu, nebo dosaženém ekvivalentním napětí.

Schopností softwaru Simufact.welding je možnost provázání výsledků simulací s programem Simufact.forming. Výsledná geometrie na konci výpočtů z prvního programu, obsahuje změněné materiálové charakteristiky a je exportovaná do druhého programu skrze formát SPR. Je tedy možné nejdříve svařit materiál v programu Simufact.welding a poté stejnou součást upravit tvářecími nebo tepelnými procesy v programu Simufact.forming, nebo naopak. Schopnost je využitelná v případech potřeby vzájemného sladění obou operací a můžeme tak zabránit vzniku nepřípustných vad, jako jsou trhliny a deformace svařence způsobené nehomogenitou pevnostních vlastností materiálu a důsledkem zbytkového napětí. Vliv převzatých výsledků simulací po lisování výlisků a jejich následné svaření k jejich vzájemnému svaření je zobrazen na obr. č. 9.



Obrázek 9 – Vliv zahrnutí výsledků tvářeni do simulace svařování [11]

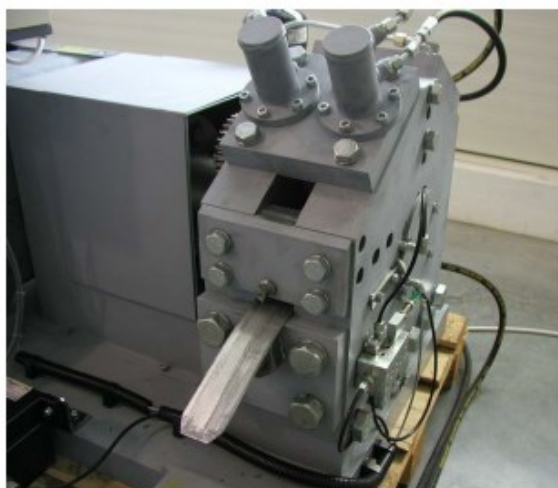
Program Simufact.welding dokáže predikovat průběh:

- zbytkových napětí a deformací v jednotlivých osách
- teplotního cyklu
- vzniku struktur ve svaru a TOO (ferit, perlit, martenzit, bainit, austenit)
- mechanické vlastnosti (tvrdost, mez pevnosti a mez kluzu)

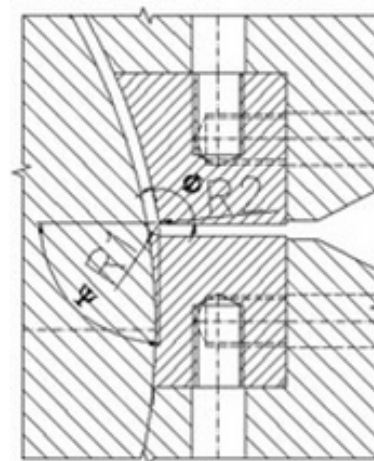
3. Charakteristika simulovaných procesů

3.1 Zařízení DRECE

Zařízení DRECE bylo zprovozněno na katedře mechanické technologie VŠB-TU Ostrava v listopadu roku 2008 a je umístěné na pracovišti CPIT. Jde o prototypové zařízení vycházející z principů zařízení DCAP (C2S2) a slouží ke kontinuálnímu zjemňování pásu plechu plastickou deformací, přičemž dojde ke zvýšení pevnostních vlastností. Zpracovávaný materiál během procesu nemění svůj průřez. Maximální šířka použitého polotovaru může být 60mm. Při zpracování oceli C55E rozebírané v této práci, byl rozměr plechu 48 x 2 x 1000 mm.

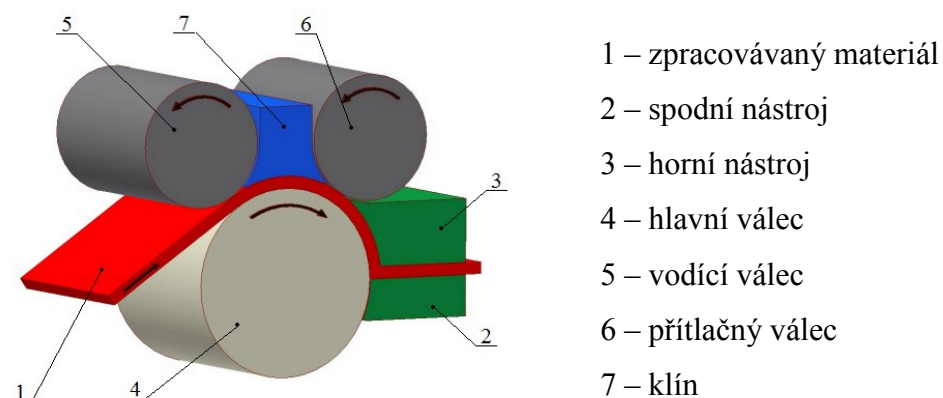


Obrázek 10 – Zařízení DRECE [8]



Obrázek 11 – Geometrie tvářecího nástroje [5]

Základními prvky zařízení DRECE jsou hlavní válec, na který je přenášen krouticí moment, vodící a přítlačný válec přitlačující zpracovávaný materiál k hlavnímu válci, klín zamezující zvlnění plechu mezi válci, nástroj tvořený horní a spodní částí a motor s převodovkou a spojkou. Rychlost protlačování je volitelná v rozsahu 0,5 – 100 mm.s⁻¹. Přítlačné válce mají možnost regulace přítlačné síly. Tvářecí nástroje jsou vyrobeny ze středně legované Cr-Mo-V oceli typu Dievar.



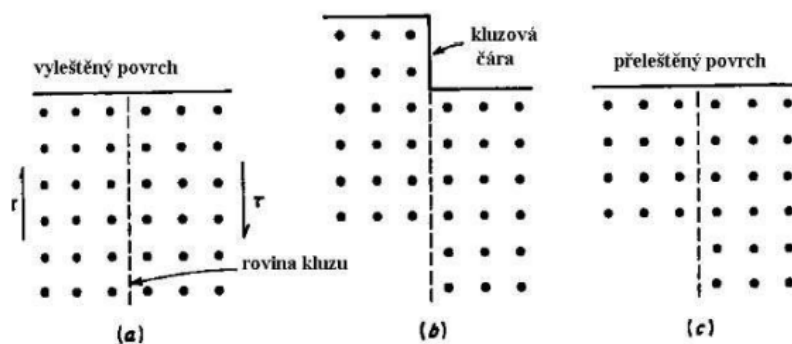
Obrázek 12 – Schéma zařízení DRECE [6]

Zpracovávaný plech se ručně vkládá mezi hlavní a vodící válec, kde dojde k jeho sevření a vedení kanálem až k tvářecím nástrojům. Zde dochází k deformaci materiálu a v důsledku střížných napětí ke zjemnění zrna. Pro dosažení požadované úrovně intenzity deformace je nutné opakovat proces s otočením vzorku kolem jeho podélné osy o 180° . Vlivem nedostatku síly potřebné pro protlačení přes nástroje, nedokáže pás plechu ve finální části procesu (po průchodu konce plechu pod vodícím válcem) projít kanálem celý, přičemž dojde k jeho zastavení v oblasti pod přitlačným válcem. K jeho vytáhnutí jsou použity čelisti ovládané hydraulickým válcem.

3.1.1 Důsledek vícenásobné plastické deformace

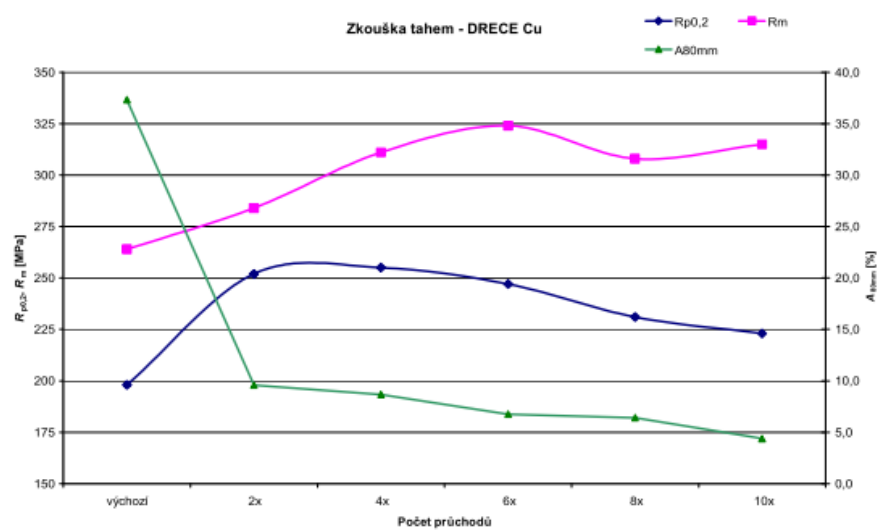
Nástroj DRECE se řadí mezi zařízení umožňující výrobu ultra-jemnozrnných materiálů (UFG) metodou vícenásobné plastické deformace (SPD), při níž dojde k zjemnění struktury materiálu a tím k významnému ovlivnění mechanických vlastností. Mezi další metody výroby UFG materiálu řadíme technologie ECAP, CONFORM atd.

Hlavní příčinou zjemnění materiálu a vzrůstu mechanických vlastností je dislokační skluz, jenž je vyvolaný smykovým napětím v tvářecím nástroji. Dislokační zpevnění má za následek zvýšení meze kluzu, meze pevnosti, tvrdosti a snížení plastických vlastností jakou je například tažnost.



Obrázek 13 – Deformace dislokačním skluzem; (a) zatížený krystal smykovým napětím; (b) zvednutí povrchu o násobek meziatomových vzdáleností; (c) přeleštěný krystal [2]

Primárně jsou zpracovávány materiály s kubickou plošně centrovanou mřížkou, které mají velké množství skluzových rovin (materiály na bázi hliníku, mědi a niklu), a proto umožňují dosažení většího dislokačního zpevnění. Materiály krystalizující v kubické prostorově centrované mřížce (α Fe, β slitiny titanu) nebo v hexagonální mřížce (α slitiny titanu) mají menší počet skluzových rovin, tudíž při stejném počtu průchodů vzorku nelze dosáhnout stejného poměru zvýšení mechanických vlastností. Jejich výchozí vlastnosti však nabízejí nepřekonatelné výhody v podobě vyšší výchozí pevnosti, biokompatibility (titan a jeho slitiny) nebo nízké ceny (oceli), a jsou důvodem pro aplikaci zpracováním SPD procesy.

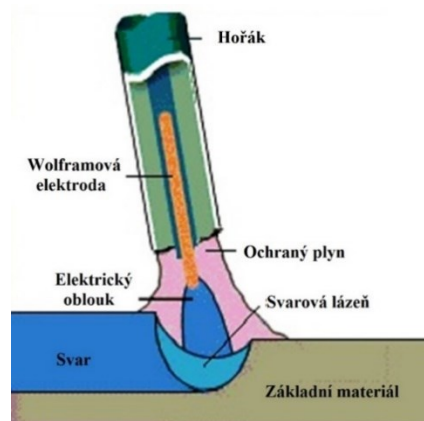


Obrázek 14 – Vliv počtu průchodů na dosažené vlastnosti materiálu Cu 99,5 [5]

3.2 Svařování TIG

Svařování TIG (metoda 141 dle ČSN EN ISO 4063) je charakteristická tím, že elektrický oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Při svařování je elektrický oblouk ochráněn před negativními účinky atmosféry inertním plynem (argon nebo směs argonu a helia). Ten je přiváděn podél osy wolframové elektrody a usměrňován keramickou hubicí do místa svaru. Délka oblouku je regulována napět'ovou regulací.

Tato metoda svařování se ve velké míře využívá při svařování neželezných materiálů jako hliník a jeho slitiny, bronzů, mědi, niklových slitin a také pro svařování korozi-vzdorných a jiných vysokolegovaných ocelí a pro svařování heterogenních spojů. Přídavné materiály v podobě drátů, tyčinek nebo pásků je možné do svaru přidávat ručním podáváním nebo automatizovaným podavačem.



Obrázek 15 – Svařovací metoda TIG [13]

Střídavé napětí – využívá se při svařování slitin hliníku, hořčíku a jejich slitin a při znečištěných svarových plochách. Dochází při něm k čistícímu efektu. Ve fázi kdy je elektroda zapojena na plus pól, se na svařovaném materiálu vytvoří katodová skvrna, která se pohybuje a vyhledává oxidy. Tyto oxidy mají nižší emisní energii elektronů a po zasažení katodovou skvrnou se oxidy vypaří. Dynamický účinkem proudu kladných elektronů směřujících na povrch svaru zapříčiní stečení vrstvy oxidů s vysokým bodem tání k okraji svaru. Toho se využívá u svařování hliníku, na jehož povrchu je vrstva Al_2O_3 s vysokou teplotou tání 2050°C .

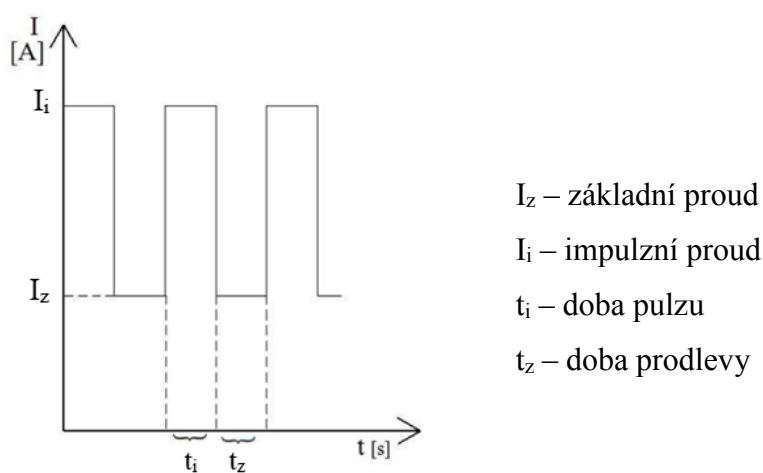
Stejnoseměrný (přímá polarita) – Určen pro svařování ocelí, mědi, niklu, titanu a jeho slitin. Elektroda zapojena na záporný pól a umožňuje vytvořit hluboký průvar. Je nutno počítat s vyšším tepelným zatížením elektrody ($3000\text{--}3500^\circ\text{C}$), na které se vyvine asi jedna třetina tepla.

Nastavení proudu závisí na druhu svařovaného materiálu a požadované hloubce průvaru.

3.2.1 Pulzní režim svařování TIG

Při tomto nastavení proud cykluje mezi dvěma nastavenými hodnotami I_i a I_z . Vyšší hodnota proudu způsobí vznik svarové lázně a umožňuje korigovat hloubku průvaru. Nižší hodnota slouží k ionizaci oblouku, při které oblouk hoří, ale materiál se nenatavuje. To vede ke snížení tepelného příkonu do svaru a k zúžení TOO. Hodnota proudu I_z je nastavována manuálně nebo volena automaticky dle velikosti I_i . Charakteristiku pulzního svařování zobrazuje obrázek č. 16.

Mezi jeho hlavní výhody patří rovnoměrná hloubka provaření, lepší ovládání svarové lázně v různých polohách, pravidelná kresba svaru a snížení šířky TOO.



Obrázek 16 – Impulzní charakteristika proudu svařovacího zdroje TIG

Používají se tři modulační proudy: [4]

- dlouhými pulzy (od 1 do 10 sekund) - pro tloušťky základního materiálu 4 až 6 mm
- pulzy s frekvencí 1 až 100 MHz – pro tloušťky základního materiálu 3 až 6 mm
- pulzy s frekvencí 1 až 20 MHz – pro svařování malých tlouštěk 0,2 až 0,8 mm

4. Charakteristika použitých materiálů při simulacích

4.1 Materiál tvářecích nástrojů v zařízení DRECE

Tvářecí nástroje v zařízení DRECE, jsou vyrobeny z oceli typu Dievar. Jedná se o středně legovanou Cr-Mo-V ocel určenou pro práci za tepla. Má vysokou houževnatost, tažnost a odolnost proti opotřebení. Nejčastější je používána pro výrobu nástrojů k tlakovému lití a tvářecích nástrojů.

Tabulka 1 – Chemické a mechanické vlastnosti oceli Dievar [10]

Chemické složení [%]								Mechanické vlastnosti	
C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V	Rm [MPa]	Tvrdost [HB]
0,3-0,4	4,5-5,5	0,4-0,6	1-1,2	≤ 0,03	≤ 0,03	0,7-1,2	0,8-1	775	230

Jelikož knihovna materiálů programu Simufact.forming neobsahuje ocel Dievar, bylo nutné zvolit jeho nejbližší ekvivalent, tím byla ocel X40CrMoV5-1 dle EN ISO 4957 (1.2344 dle ČSN EN 10027-2). Její mechanické i chemické složení jsou až na menší odchylky velmi blízké oceli Dievar. Je charakterizována jako nástrojová ocel určena k práci za tepla.

Tabulka 2 – Chemické a mechanické vlastnosti oceli X40CrMoV5-1[10]

Chemické složení [%]								Mechanické vlastnosti	
C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V	Rm [MPa]	Tvrdost [HB]
0,37-0,43	4,8-5,5	0,3-0,5	1,2-1,5	≤ 0,03	≤ 0,03	0,9-1,2	0,9-1,1	792	235

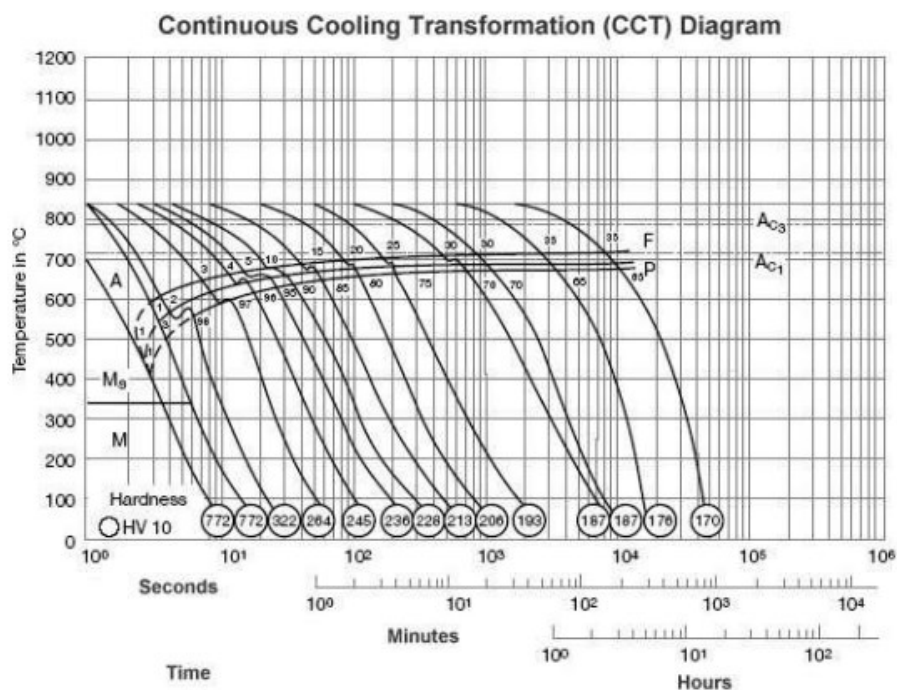
4.2 Materiál zpracovávaného materiálu

Zpracovávaným materiálem je konstrukční uklidněná nelegovaná vysokouhlíková ocel C55E dle EN 10083-2 (1.1203 dle ČSN EN 10027-2). Jde o ocel určenou k zušlechťování a povrchovému kalení. Je využívána k výrobě hřídelí turbokompresorů, ozubených kol, ozubených věnců, pístnic a různých spojovacích zařízení. Je vhodná pro tváření za tepla při teplotách 850 – 100°C. Při svařování je vhodné použít předehřev v intervalu teplot 150-260°C.

Tabulka 3 – Chemické a mechanické vlastnosti oceli C55E [10, 14]

Chemické složení [%]								Mechanické vlastnosti		
C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Rm [MPa]	Re [MPa]	A _{10mm} [%]
0,52- 0,6	≤0,4	0,6- 0,9	≤0,4	≤0,03	≤0,03	≤0,4	≤0,1	680	370	15

Mechanické hodnoty reprezentují stav po normalizačním žíhání polotovaru o tloušťce 0,3 – 3 mm.



Obrázek 17 – ARA diagram oceli C55E [16]

Knihovna materiálu programu Simufact.forming neobsahuje ocel C55E, proto bylo nutné vybrat vhodný ekvivalent s dostatečně popsány mechanickými vlastnostmi jak pro zpracování v nástroji DRECE (tj. zpracování za nízkých teplot), tak pro svařování (vlastnosti definované v celém spektru teplot od 20°C do teploty tavení).

Pro použití při svařování musí mít materiál popsané tyto vlastnosti v závislosti na teplotě:

- hustota, modul pružnosti, Poissonovo číslo
- tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, tepelná roztažnost, teploty solidu a likvidu materiálu
- křivky zpevnění při různých rychlostech deformací
- ARA (CCT) a IRA (TTT) diagramy

Jediným možným ekvivalentem mezi uhlíkovými oceli v dostupné knihovně materiálu je ocel C45, která má své vlastnosti popsané ve spektru teplot do 0 °C až do teploty 1000 °C. Pro možnost použití materiálu pro svařování, bylo nutné prodloužit křivky popisující materiálové vlastnosti až do teplot tavení. Díky tomu může být použita pro jakoukoliv tvářecí i svařovací operaci. Zdrojem dat je knihovna materiálů JMatPro.

4.2.1 Charakteristika vybraného materiálu pro zpracování

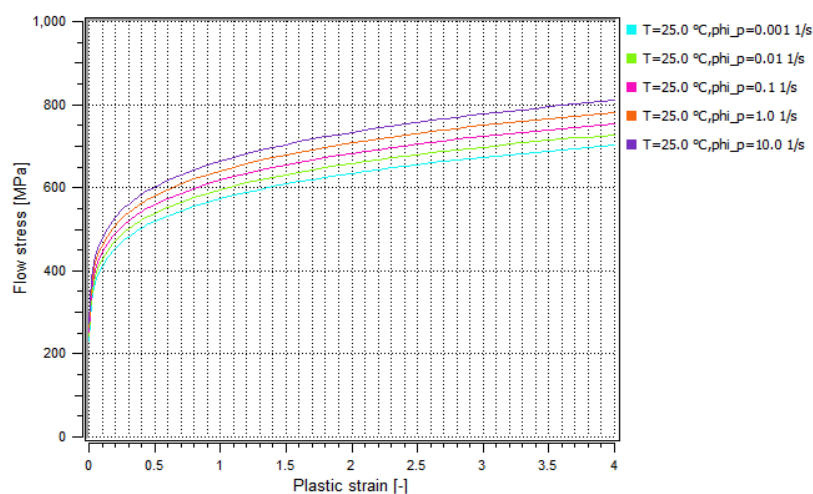
Ocel C45 dle EN 10083-2 (1.0503 dle ČSN EN 10027-2) je konstrukční uhlíková ocel vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Používá se pro výrobu hřídel těžkých strojů, karuselů, větších ozubených kol, ojníc atd. Je vhodná pro tváření při teplotách 800 – 1150°C.

Tabulka 4 – Chemické a mechanické vlastnosti oceli C45 [10, 15]

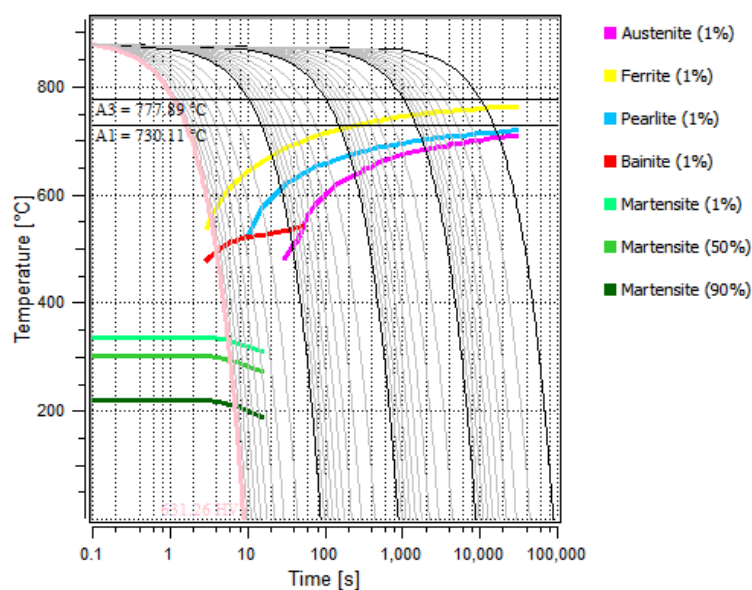
Chemické složení [%]								Mechanické vlastnosti		
C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	R _m [MPa]	Re [MPa]	A ₁₀ [%]
0,43- 0,5	≤0,4	0,5- 0,8	≤0,4	≤0,03	≤0,03	≤0,4	≤0,1	620	305	18

Mechanické hodnoty reprezentují stav po normalizačním žíhání polotovaru o tloušťce do 16 mm.

Oproti materiálu C55E, jenž byl použit v reálném experimentu, se chemické složení oceli C45 liší pouze v rozdílu obsahu uhlíku, který je o 0,1 % nižší. Tudíž se jedná o středně legovanou ocel, která má obsah uhlíku na horní hranici rozdělení mezi středně uhlíkovou a vysoce uhlíkovou ocelí. Vlivem nižšího obsahu uhlíku oproti oceli C55E má nepatrně nižší pevnostní vlastnosti a lepší tvářecí vlastnosti.



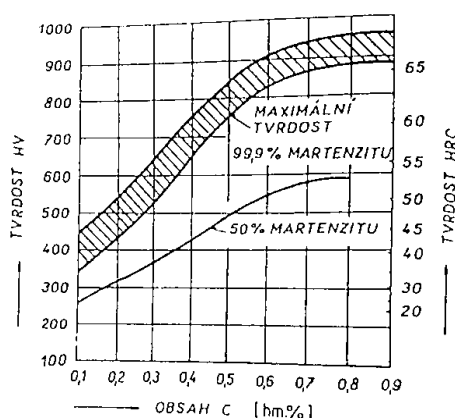
Obrázek 18 – Křivka zpevnění oceli C45 z knihovny Simufact.material [9]



Obrázek 19 – CCT diagram oceli C45 z knihovny Simufact.material [9]

4.3 Svařitelnost oceli C55E zpracované SPD procesem

Vysoký obsah uhlíku v oceli C55E (0,52 až 0,6 % C) při svařování má za následek vznik tvrdé martenzitické struktury. Ta má oproti původní feriticko-perlitické struktuře vyšší tvrdost (až 880 HV při 99,9 % martenzitu ve struktuře), ale nižší plastické vlastnosti. Významně negativně ovlivňuje úroveň nárazové práce. Uhlík také významně zvyšuje náchylnost na vznik studených trhlin indukovaných difúzním vodíkem. K tvorbě studených trhlin rovněž přispívá vyšší tuhost konstrukce. Vhodným nástrojem pro snížení vlivu vodíku je v první řadě zamezení možnosti průniku vodíku do svaru a poté prodloužení času ochlazování umožňující difuzi vodíku ven ze svaru.



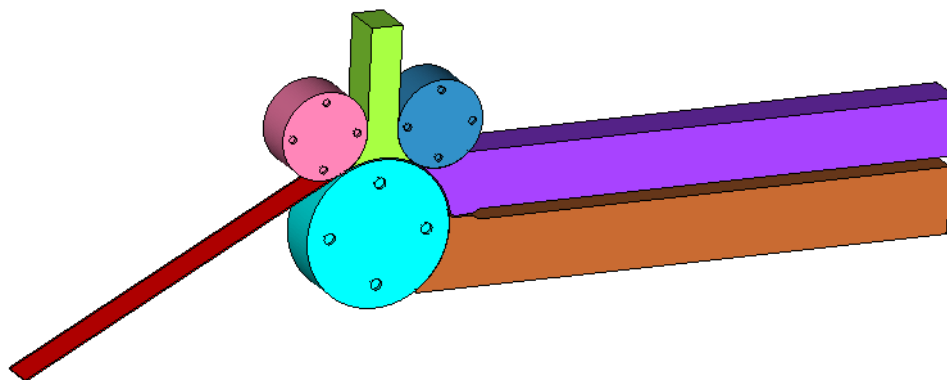
Obrázek 20 – Závislost tvrdosti svarového spoje na obsah uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO [1]

Při svařování dochází ve svarovém kovu a teplem ovlivněné oblasti k překrystalizaci. Překrystalizace probíhá v oblastech vystaveným teplotám nad A_{c1} a způsobuje obnovu výchozí struktury a zhrubnutí zrn. Tím degraduje dosažené zjemnění získané SPD procesy. Z těchto důvodů je nutné snížit šířku svarového kovu a teplem ovlivněné oblasti na minimum.

Z jasně definovaných podmínek svařování vyplývá nutnost použití metody s dokonalou ochranou svarové lázně proti účinkům vodíku v okolní atmosféře a zajistit v co nejmenší míře tepelné ovlivnění základního materiálu. Mezi použitelné metody tedy patří svařování svazkem elektronů, laserovým paprskem a plazmou. Použitelnou metodou je i TIG v pulzním režimu zaručující dokonalou ochranu svarového kovu použitím inertních ochranných plynů a zároveň úzkou TOO vlivem nízkého tepelného příkonu díky pulzaci zdroje.

5. Matematická simulace procesu protlačování pásu plechu

Pro simulaci vícenásobné plastické deformace pomocí DRECE zařízení byl použit program Simufact.forming ve verzi 12.0.1. Pro vytvoření projektu bylo využito modulu válcování za studena ve 3D prostředí. Podrobný popis nastavení procesu je uveden v příloze A.



Obrázek 21 – DRECE zařízení v Simufact.forming

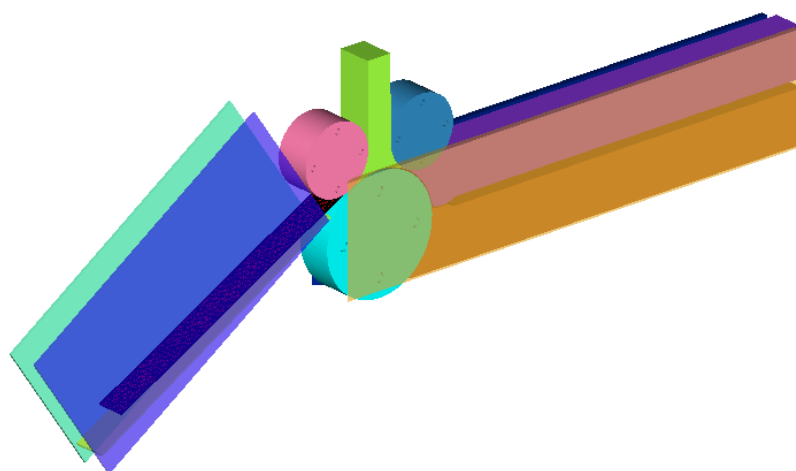
5.1 Vložená geometrie

Importovaná geometrie zařízení byla vytvořena v programu INVENTOR 2009 a skládá se z hlavního válce, dvou přítlačných válců, mezi kterými je klín, spodního a horního nástroje. Rádus nástrojů musel být zvětšen z důvodu proveditelnosti simulace v závislosti na velikosti elementu sítě.

Geometrie nastavení nástroje je následující: uhel nástrojového kanálu $\Phi = 100^\circ$, vnější nástrojový úhel $\Psi = 0^\circ$, poloměr $R_1 = 10 \text{ mm}$ a $R_2 = 10 \text{ mm}$.

Při použití velikosti elementu 5mm bylo nutné zvětšit šířku zpracovávaného plechu ze 48 mm, jenž byla použita v experimentu, na šířku 50 mm z důvodu vytvoření elementů se stejnými rozměry napříč plechem. Při použití originální šířky 48 mm měli krajní elementy plechu rozměr 4 x 5 mm a tato nesourodost měla vliv na nehomogenitu napětí v hlavních osách. Délka plechu byla zkrácena pro snížení výpočtového času z délky 1000 mm na 500 mm. Zpracovaný plech měl tedy rozměr 50 x 2 x 500 mm.

Pro zamezení vychýlování vzorku a zachování jeho šířky, která by měla být v průběhu procesu neměnná, byly do procesu přidány geometrie pro přesnější vedení plechu ve směru pohybu. Jedná se o podavač zajišťující přímý pohyb plechu při vsunování plechu mezi hlavní a vodící válec a opěrné stěny zamezující vychýlení plechu po průchodu nástroji. Všem těmto pomocným geometriím, které v reálném experimentu nefigurují, bylo přiřazeno nulové tření s polotovarem. Geometrie přidržovačů byla vytvořena v programu Solid Works 2014.



Obrázek 22 – Kompletní geometrie zařízení DRECE

5.2 Zadané vstupní parametry pro simulaci DRECE zařízení

Použitým geometriím je nutné přiřadit okrajové podmínky procesu. Jedná se o typ použitého materiálu, třecí vlastnosti, typ použitého stroje a jeho parametry a teplotní charakteristiky prostředí.

Tabulka 5 – Nastavené okrajové podmínky

Okrajová podmínka	Hodnota	Jednotka
Teplota nástrojů	20	[°C]
Teplota polotovaru	20	[°C]
Teplota okolí	20	[°C]
Materiál nástrojů	ocel X40CrMoV5-1	
Materiál zpracovávaného plechu	ocel C45	
Koeficient tření (plech/válce)	$f = 0,65$	[-]
Koeficient tření (plech/nástroje)	$f = 0,1$	[-]
Koeficient tření (plech/pomocné prvky)	$f = 0$	[-]
Úhlová rychlost hnacího kola	$\omega = 0,01745$	[rad.s ⁻¹]
Průměr hnacího kola	$D = 198$ mm	[mm]
Tlak přítlačného válce	$p_{\text{př.}} = 140$	[MPa]
Přítlak vodícího válce	$p_{\text{vod.}} = 0,08$	[kN]

5.3 Volba sítě konečných prvků

Volba druhu sítě a velikosti prvku je jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující dosažené hodnoty intenzity deformace a má významný vliv na dobu potřebnou pro simulaci. Simulace probíhali při použití dvou druhů sítě (Sheetmesh a slMesh Tetra). Sheetmesh je výchozí sítí pro zasiťování polotovarů ve formě plechů pro následné zpracování například při válcování, ohýbání, lisování atd.

Sít slMesh Tetra je používána pro velmi složité polotovary, které jsou podrobeny velkým objemovým změnám tvaru jako je kování, protlačování atd. Tato sít je vhodnější pro simulaci důsledků deformace probíhající v nástrojích. Z toho důvodu byly použity oba dva druhy sítě a jejich vliv na dosažené vlastnosti při vícenásobné plastické deformaci bude

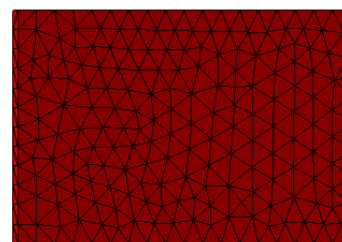
rozebrán v kapitole 5.6. Rozměr prvku s ohledem na délku výpočtu simulací byl zvolen u obou sítí 5 mm a přesítování (remeshing) probíhá při dosažení intenzity deformace 0,4.

První typ elementu použitých při simulaci je HEXAHEDRAL (šestistěn) a využívá jej síť konečných prvků SHEETMESH se třemi elementy v tloušťce plechu. Při volbě této sítě je polotovar definovaný 3000 elementy.



Obrázek 23 – Sítování Sheetmesh

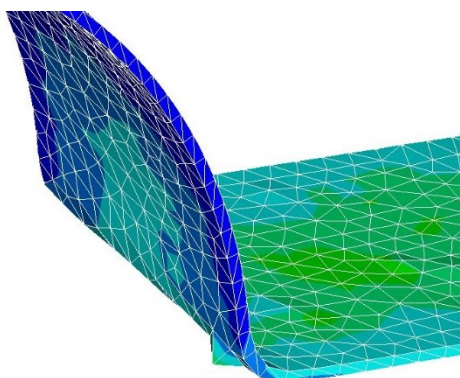
Druhý typ elementu byl TETRAHEDRAL (čtyřstěn) využívající síť sMesh Tetra. Při této volbě sítě je polotovar definovaný 6827 elementy.



Obrázek 24 – Sítování sMesh Tetra

5.4 Pokročilé nastavení procesu

Typ řešitele (Solveru) byl zvolen Multifrontal Sparse (2D/3D), který umožňuje využití více jader procesoru při numerickém výpočtu. Výpočet probíhal při pevném kroku 1200 kroků. Do výsledků byl zahrnut vliv deformačního zpevnění, akumulované plastické deformace a celkového tenzoru deformace. Nejdůležitější vliv na chybovost elementů při výpočtu mělo nastavení tolerance kontaktu. Při nastavení tolerance kontaktu na 0 mm došlo k významnému prodloužení doby výpočtu simulace a zároveň docházelo k chybám elementů (viz obr. 25). Po vyzkoušení několika variant byla zvolena jako nejvhodnější tolerance 0,02 mm.



Obrázek 25 – Příklad chyby sítě

5.5 Výsledky vícenásobné plastické deformace

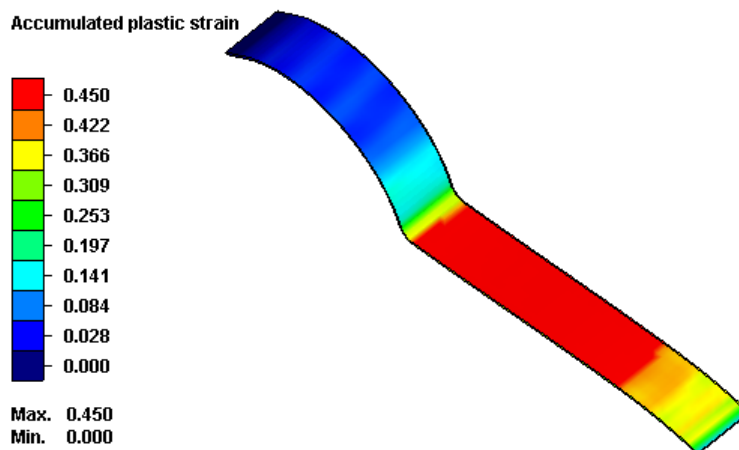
Z hlediska tváření nás nejvíce zajímá hodnota dosažené intenzity deformace a hodnota maximální intenzity napětí s její lokalizací. Z důvodu dalšího použití při svařování je důležité vykreslit napětí v ose X a Z tak aby mohly být výsledky verifikovány s experimentem. Pro přesnější výsledky je výsledná intenzita deformace zachycena na příčném průřezu plechu a velikost intenzity napětí v podélném průřezu v oblasti průchodu nástroji v polovině šířky plechu.

Zpracovávaný plech vlivem snižování plochy dotyku s hlavním válcem na konci procesu, nedokázal přenést na sebe dostatečně velkou posuvovou složku síly z hlavního válce a došlo k zastavení plechu. Při dalších průchodech se délka plechu, jež neprošel přes nástroj, zvětšovala. To bylo dané potřebou vyšší síly nutné k protlačení plechu přes nástroj.

V reálném experimentu se plech zastaví v oblasti před přitlačným válcem a je nutné použít speciálních hydraulických čelistí pro jeho vytažení. V simulacích byl pro další průtah převzat deformovaný plech, jehož konec plechu nebyl zpracovaný. Na délku nezpracované části má vliv nejenom velikost tření, ale i velikost a typ elementu, jehož menší velikost vede ke zvýšení plochy dotyku z válcem.

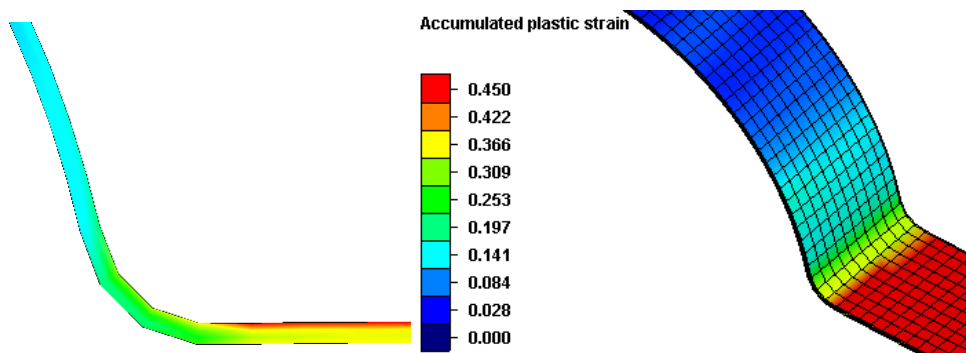
5.5.1 Velikost intenzity deformace a intenzity napětí při použití síťování SHEETMESH

Dosažené vlastnosti po 1. průchodu nástrojem DRECE



Obrázek 26 – Dosažená intenzita deformace při 1. průchodu

Z obrázku 26 je patrný prokazatelný vliv průchodu plechu přes nástroje na zvýšení hodnoty deformace. V přední části plechu o délce 72 mm se projevuje značné snížení dosažené deformace.

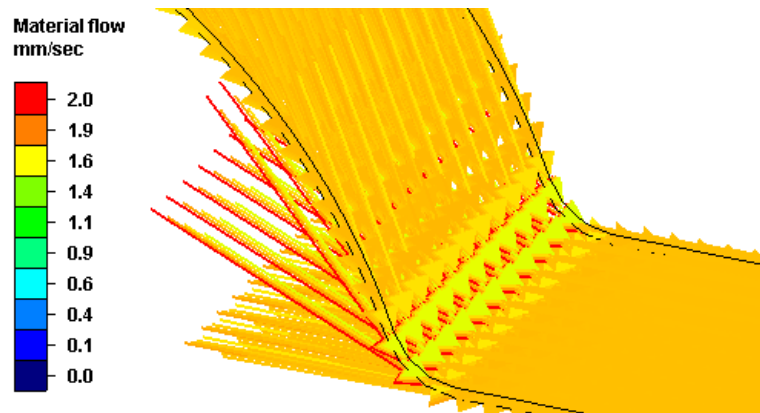


Obrázek 27 – Intenzita deformace při 1. průchodu v podélném řezu ve středu plechu

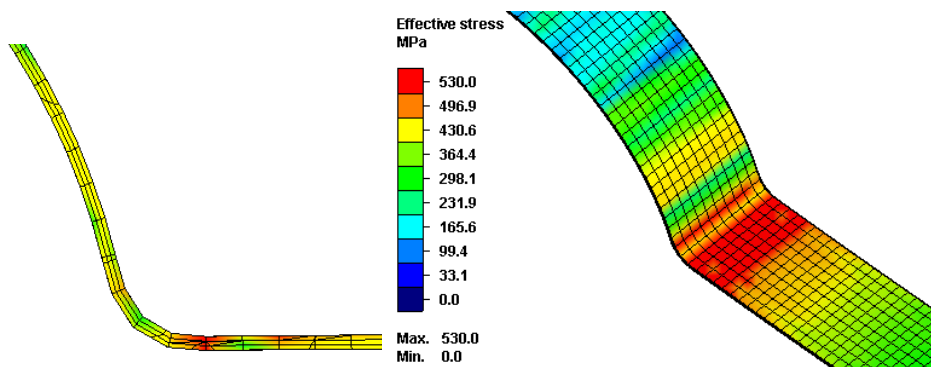
Obrázek 28 – Intenzita deformace při 1. průchodu

Z výsledků je evidentní, že intenzita deformace na horní ploše plechu vykazuje vyšší hodnoty, než ve středu plechu a spodní ploše. Intenzita deformace na povrchu po prvním průchodu dosahuje hodnot $\epsilon_{\max} = 0,45$ a ve středu plechu 0,37. Rozdíl mezi hodnotami je dán vlivem tření o horní nástroj. Proces je patrný z obrázku č. 27. Rychlost toku materiálu

při průchodu je $1,9 \text{ mm.s}^{-1}$. V nástrojích dochází na vnitřním rádiusu ke zpomalování toku materiálu a na vnějších rádiusu ke zrychlování.



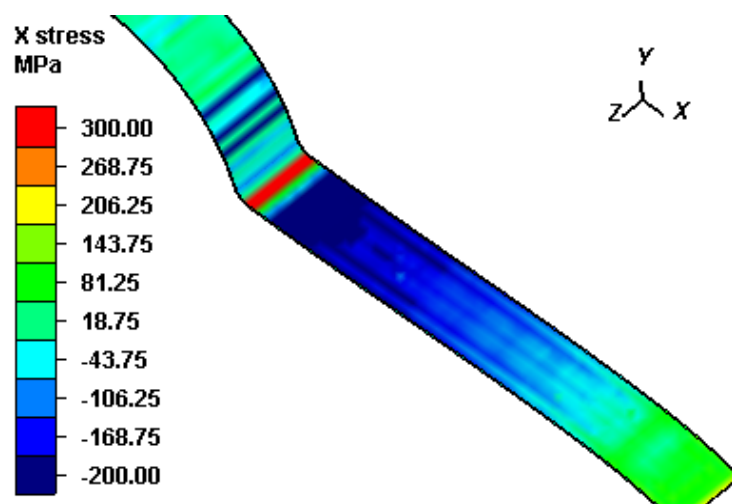
Obrázek 29 – Rychlosti toku materiálu při 1. průchodu



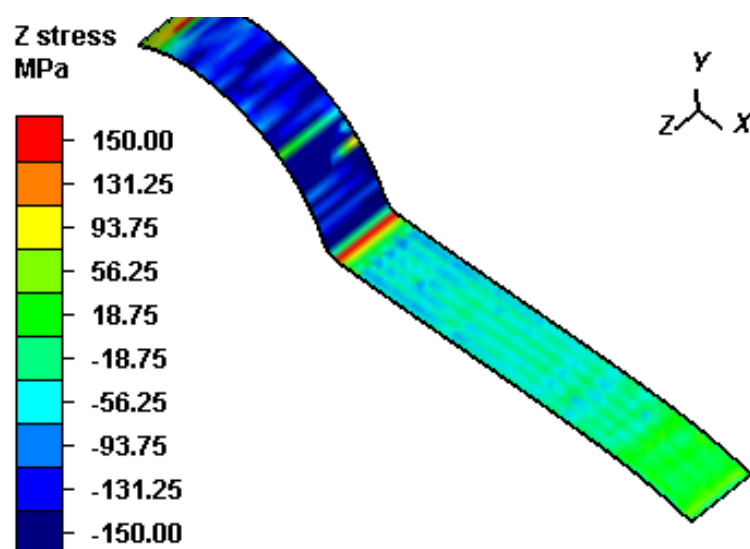
Obrázek 30 – Intenzita napětí při 1. průchodu v podélném řezu ve středu plechu

Obrázek 31– Intenzita napětí při 1. průchodu nástrojem

Maximální hodnoty intenzity napětí je dosaženo v oblasti rádiusu nástrojů. Zde maximální napětí dosahuje hodnot 530 MPa.



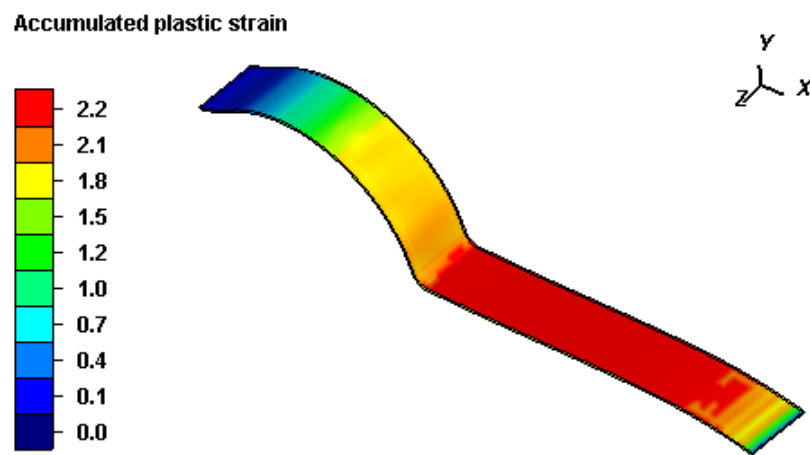
Obrázek 32 – Napětí v ose X při 1. průřezu



Obrázek 33 – Napětí v ose Z při 1. průřezu

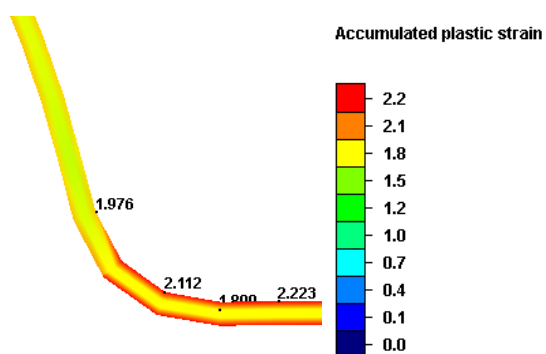
Rozložení napětí v jednotlivých osách je ovlivněno zvolenou velikostí elementů. Použitá síť Sheetmesh způsobovala rozptýl hodnot kopírujících rastr mřížky sítě konečných prvků. Napětí dosahují záporných hodnot a průměrné napětí v podélném směru osy X je $\sigma_x = -130 \pm 20$ MPa a příčném směru v ose Z je $\sigma_z = 45 \pm 15$ MPa.

Dosažené vlastnosti po 6. průchodu nástrojem DRECE

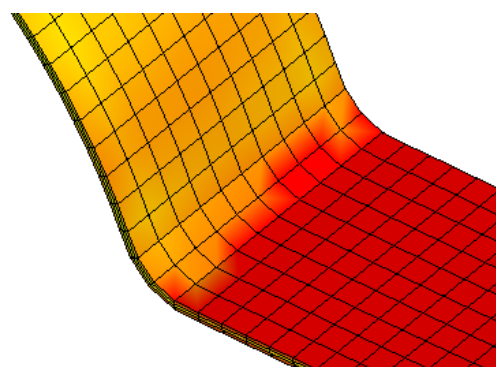


Obrázek 34 – Dosažená intenzita deformace při 1. průchodu

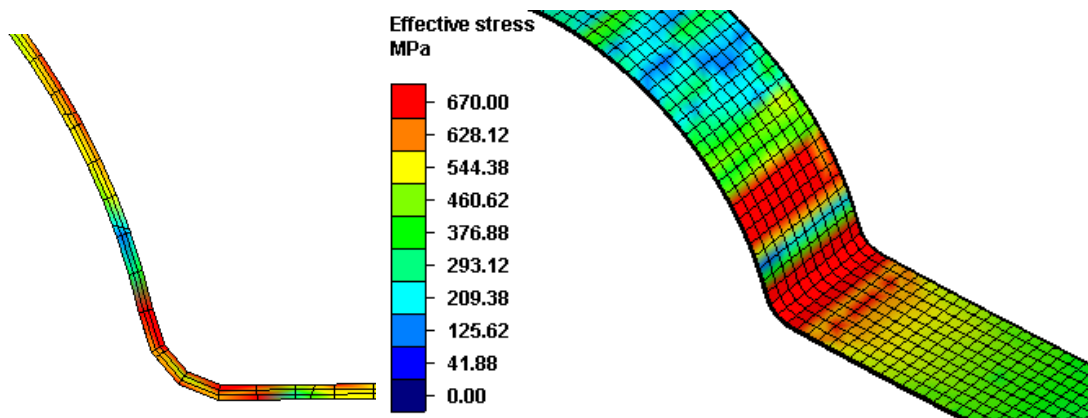
Po 6. průchodu intenzita deformace dosahuje hodnoty $\epsilon_{\max} = 2,2$ a průběh rychlosti toku materiálu je totožná jako u prvního průchodu. Opět je patrná dosažená nižší intenzita deformace na začátku plechu.



Obrázek 35 – Intenzita deformace ve středu plechu po 6. průchodu



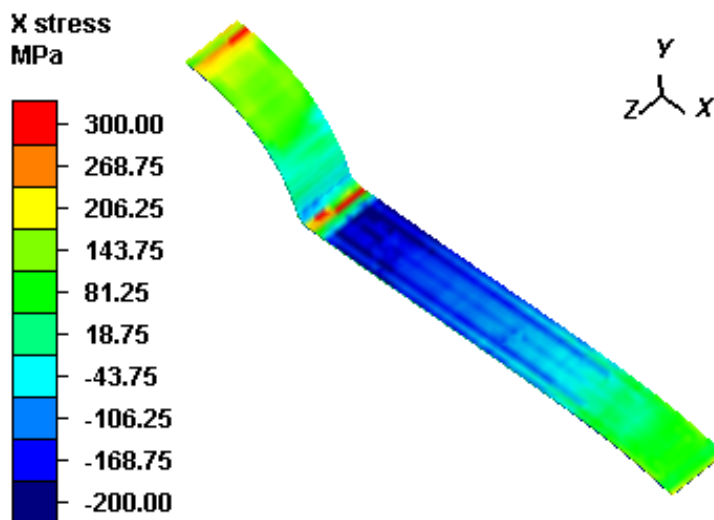
Obrázek 36 – Intenzita deformace po 6. průchodu



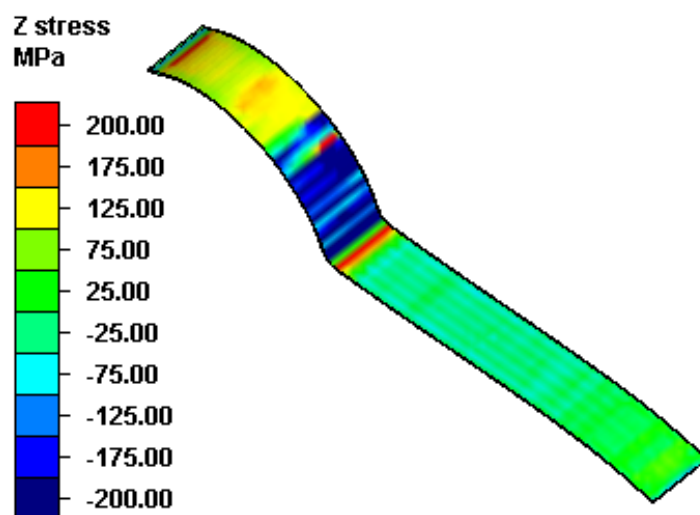
Obrázek 37 – Intenzita napětí ve středu plechu po 6. průchodu nástrojem

Obrázek 38 – Intenzita napětí po 6. průchodu nástrojem

Maximální intenzita napětí dosahuje hodnoty $\sigma_{\max} = 670$ MPa.



Obrázek 39 – Napětí v ose X po 6. průchodu



Obrázek 40 – Napětí v ose Z při 6. průchodu

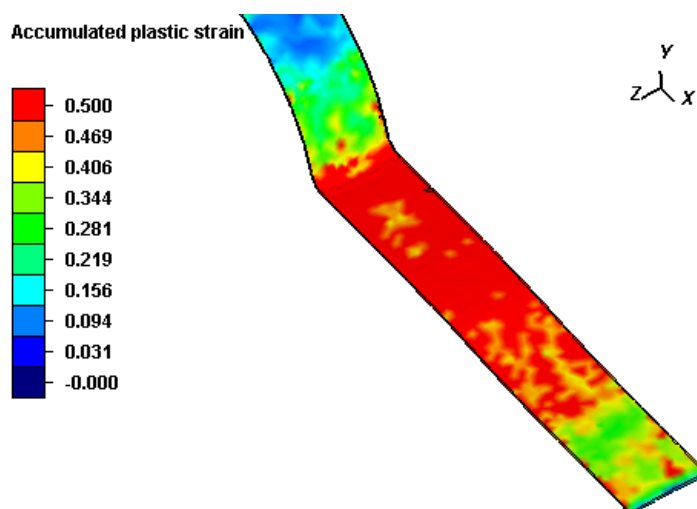
Výsledné zbytkové napětí vykazuje opět určitý rozptyl hodnot ovlivněný rastrem mřížky. V polovině vzorku po 6. průchodu dosahuje napětí v ose X hodnot $\sigma_x = -120 \pm 20$ MPa a v ose Z $\sigma_z = -45 \pm 15$ MPa.

Tabulka 6 – Vliv počtu průchodů na dosažené hodnoty deformace a napětí

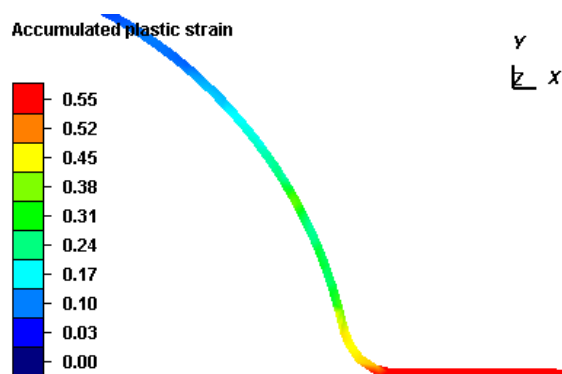
Průchod	Maximální intenzita deformace ε_{\max} [-]	Intenzita napětí σ_{\max} [MPa]
1.	0,45	530
2.	0,79	580
3.	1,25	615
4.	1,53	635
5.	1,95	660
6.	2,25	670

5.5.2 Velikost intenzity deformace a intenzity napětí při použití síťování sIMeshTetra

Dosažené vlastnosti po 1. průchodu nástrojem DRECE

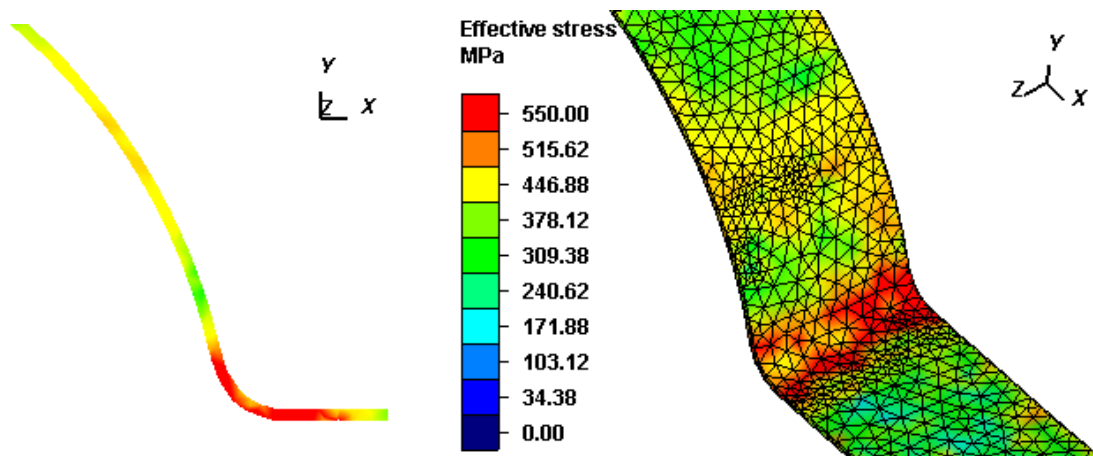


Obrázek 41 – Dosažená intenzita deformace při 1. průchodu



Obrázek 42 – Intenzita deformace při 1. průchodu
v podélném řezu ve středu plechu

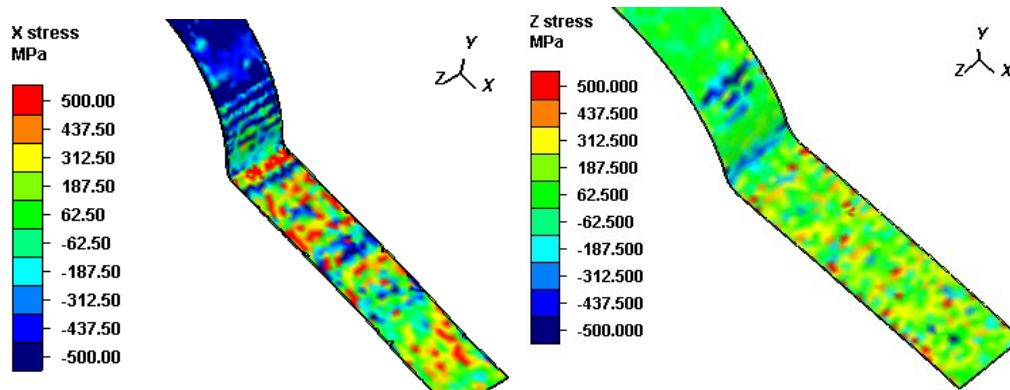
Dosažená deformace po prvním průchodu je prokazatelně vyšší než při použití síťování Sheetmesh. Opět se přední část plechu vyznačuje sníženou intenzitou deformací. Průměrná hodnota intenzity deformace je 0,55.



Obrázek 43 – Intenzita napětí při 1. průchodu v podélném řezu ve středu plechu

Obrázek 44 – Intenzita napětí při 1. průchodu nástrojem

Maximální hodnoty intenzity napětí je dosaženo v oblasti začátku rádiusu horního nástroje, kde napětí dosahuje maximálních hodnot 550 MPa.

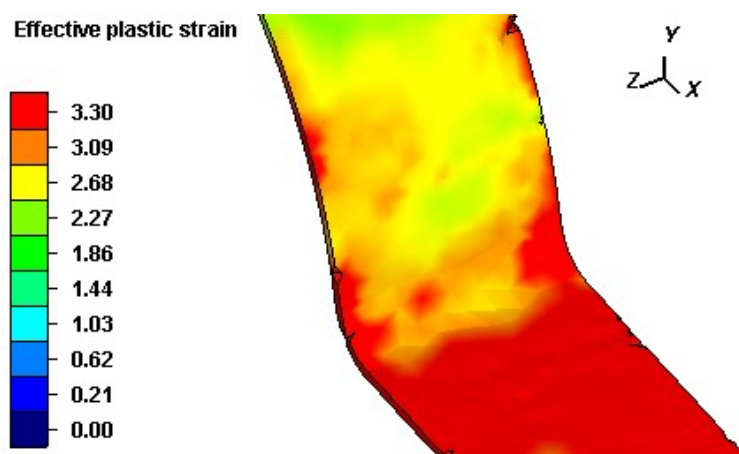


Obrázek 45 – Napětí v ose X při 1. průchodu

Obrázek 46 – Napětí v ose Z při 1. průchodu

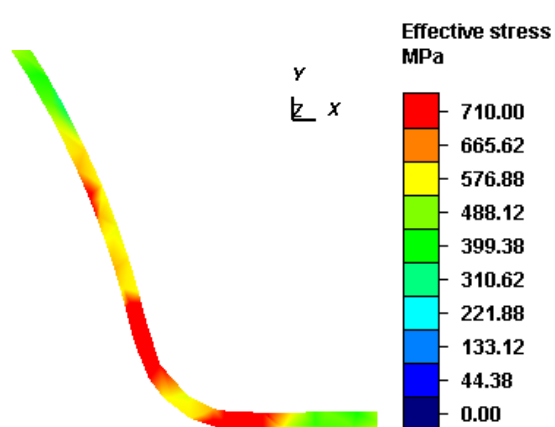
Dosažené napětí v jednotlivých osách vykazuje velké odchylky. Většina bodů vykazuje kladné napětí.

Dosažené vlastnosti po 6. průchodu nástrojem DRECE

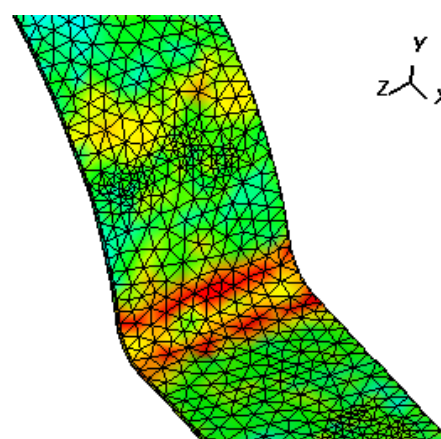


Obrázek 47 – Dosažená intenzita deformace při 1. průchodu

Po 6. průchodu intenzita deformace dosahuje hodnoty $\epsilon_{\max} = 3,3$.

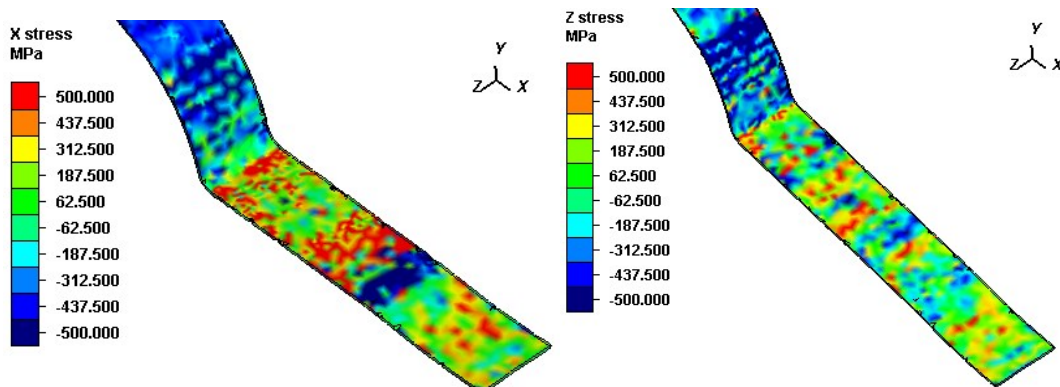


Obrázek 48 – Intenzita napětí ve středu plechu po 6. průchodu



Obrázek 49 – Intenzita napětí po 6. průchodu nástrojem

Intenzita napětí dosahuje maximální hodnoty $\sigma_{\max} = 710$ MPa.



Obrázek 50 – Napětí v ose X při
6. průchodu

Obrázek 51 – Napětí v ose Z při
6. průchodu

Napětí v jednotlivých osách opět dosahuje příliš velké nehomogenity. Při průběhu zpracování dochází k velkým skokům napětí v jednotlivých bodech. Z hlediska napětí není vhodné použít plech ze sítě slMesh Tetra pro další zpracování svařováním.

Tabulka 7 – Vliv počtu průchodů na dosažené hodnoty deformace a napětí při použití
sítě konečných prvků SheetMesh

Průchod	Maximální intenzita deformace ε_{\max} [-]	Intenzita napětí σ_{\max} [MPa]
1.	0,55	550
2.	1,2	610
3.	1,65	645
4.	2,3	680
5.	2,7	700
6.	3,3	710

5.6 Vyhodnocení simulace zpracování plechu v DRECE zařízení

Ze získaných dat je evidentní vliv průchodu plechu přes nástroj DRECE na dosaženou velikost intenzity deformace. Dominantní vliv na získané vlastnosti má volba druhu sítě konečných prvků.

Při použití sítě SheetMesh s prvky rozloženými tak, že vytváří mezi sebou šestistěny, bylo po 6 průchodech zařízením Drece dosaženo intenzity deformace $\epsilon_{\max} = 2,2$. Při použití sítě slMesh Tetra s prvky rozloženými tak, že vytváří mezi sebou čtyřstěny, došlo k nárůstu deformace až na hodnotu intenzity deformace $\epsilon_{\max} = 3,3$. Maximální intenzita napětí při posledním šestém průchodu vystoupala při použití SheetMesh na hodnotu 670 MPa a při použití sítě slMesh Tetra 710 MPa.

Napětí v osách X a Z při použití síťování Sheetmesh po šesti průchodech vykazovalo vnesení tlakových napětí o velikostech $\sigma_x = -120 \pm 20$ MPa a $\sigma_z = -45 \pm 15$ MPa. Při použití sítě slMesh Tetra bylo napětí v osách v průběhu zpracování velmi kolísavé. Proto se jeví síťování slMesh Tetra jako nevhodné pro další použití pro svařování

K převedení do programu Simufact.welding bylo s ohledem na průběh napětí převeden pouze zpracovaný plech se sítí Sheetmesh.

Tabulka 8 - Dosažené hodnoty plechu určeného pro následné svaření

Intenzita deformace ϵ_{\max} [-]	Zbytkové napětí v ose X σ_x [MPa]	Zbytkové napětí v ose Z σ_z [MPa]
2,2	-120 ± 20	-45 ± 15

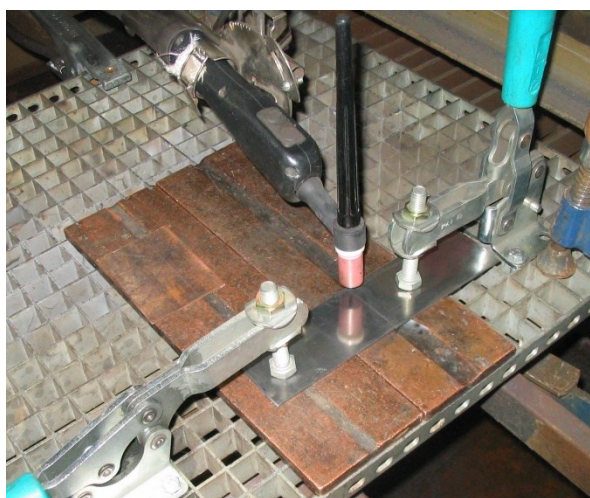
6. Matematická simulaci procesu svařování pásu plechu upraveného DRECE zařízením

Zdrojem informací pro simulaci bylo svařování na reálných vzorcích, které probíhalo v roce 2013 a zabývá se jím bakalářská práce na téma „*Hodnocení vybraných vlastností svarového spoje nízkouhlikové oceli zpracované vícenásobnou plastickou deformací*“ [7]. Při něm byly svařeny plechy ve výchozím stavu a ve stavu po vícenásobné plastické deformaci získané v zařízení DRECE. Plechy se k sobě svařovaly stranami o délce 48mm bez použití přídavného materiálu.

Kvůli nemožnosti simulačních programů oříznout plech bez toho, aby došlo k ovlivnění získaných vlastností, tak jak to dovoluje v reálném procesu zpracování ořezáním na pilách, bylo nutné použít kompromis v podobě pouhého provaření plechu. Při něm tedy nedošlo ke spojování více plechů v jeden kus, ale pouze k protavení jednoho plechu tepelným zdrojem vytvářejícím stejně velkou svarovou lázeň jako v reálném experimentu.

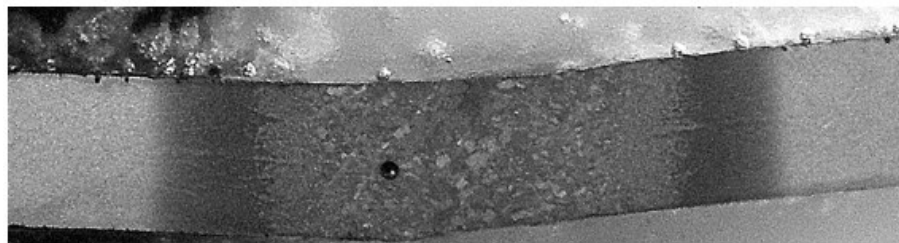
6.1 Parametry svařování na reálných vzorcích

Svařování v reálném experimentu probíhalo na výchozím nezpracovaném plechu a na plechu zpracovaném procesem DRECE. Svařovalo se metodou TIG v pulzním režimu bez použití přídavného materiálu a bez použití předehřevu základního materiálu. Plechy byly svařeny tupým svarem bez použití úkosu, přičemž svarový kov byl tvořen pouze roztaveným základním materiálem. Svarové plochy byly před svařováním zarovnány na kotoučové pile. K uchycení plechu ke svařovacímu stolu bylo užito dvou svěrek, přičemž každá upínala jeden plech.



Obrázek 52 – Příprava před svařováním [7]

Z fotky makrostruktury svaru lze zjistit šířku svarového kovu, přičemž tento údaj slouží jako hlavní parametr ovlivňující šířku svarové lázně v simulacích.



Obrázek 53 – Makrostruktura vzorku DRECE-6x (zv. 10x) [7]

- Šířka svarového kovu = 3,7 mm
- Šířka přehřáté hrubozrné oblasti = 1 mm
- Šířka TOO mezi hrubým zrnem a neovlivněným materiálem = 1,2 mm

Výpočet použitého tepelného příkonu

Při svařování TIG v pulzním režimu je výsledný tepelný příkon závislý především na velikosti horního proudu I_1 , který má dominantní vliv na vnesené teplo do svaru. Spodní proud I_2 dovoluje ochlazení svarové lázně a tím snižuje tepelná příkon. Výsledný tepelný příkon je tedy v určitém poměru mezi horním proudem I_1 a spodním (základním) proudem I_2 .

Při experimentu byla vybrána jako nejvhodnější rychlost svařování 9 cm/min, která byla použita při svařování upraveného plechu DRECE 6x. Tato rychlost svařování je také použita v simulacích.

Tabulka 9 – Parametry svařování [7]

Vzorek	Proud I_1 [A]	Proud I_2 [A]	Napětí U_1 [V]	Napětí U_2 [V]	Čas pulzu t_1 [s]	Čas základního proudu t_2 [s]	Svařovací rychlost [cm/min]
A - Výchozí stav	40	13	9	8	0,7	0,1	11
B - DRECE 6x	40	13	9	8	0,7	0,1	9

Efektivní tepelný příkon při horním proudu Q_{1ef} :

$$Q_{1ef} = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} = 0,6 \cdot \frac{9 \cdot 40}{1,5} \cdot 10^{-3} = 0,144 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad [1]$$

Efektivní tepelný příkon při spodním proudu Q_{2ef} :

$$Q_{2ef} = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} = 0,6 \cdot \frac{8 \cdot 13}{1,5} \cdot 10^{-3} = 0,04 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad [1]$$

Výsledný efektivní tepelný příkon se nachází mezi hodnotami Q_{1ef} a Q_{2ef} a jeho hodnotu lze vypočítat dle poměru času působení jednotlivých pulzů. Vypočítanou hodnotu je nutno brát pouze jako orientační údaj.

Výsledný efektivní tepelný příkon Q_{ef} :

$$Q_{ef} = \frac{(Q_1 \cdot t_1 + Q_2 \cdot t_2)}{t_1 + t_2} = \frac{(0,144 \cdot 0,7 + 0,04 \cdot 0,1)}{0,7 + 0,1} = 0,131 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

kde: k – koeficient tepelné účinnosti metody svařování – metoda TIG = 0,6

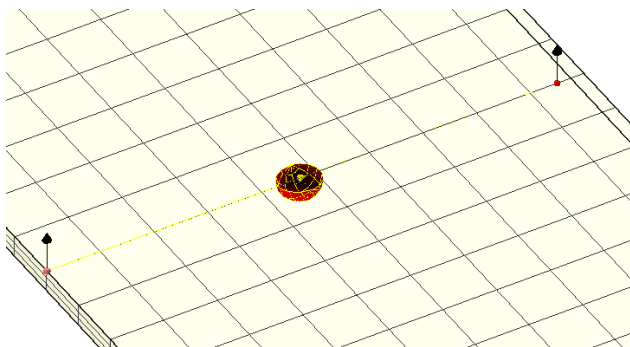
U, I, v - svařovací parametry [V, A, mm.s⁻¹]

6.2 Vstupní parametry pro simulaci svařování

Výsledky simulací po zpracování v programu Simufact.forming se přenáší skrze soubor ve formátu. SPR, který je vygenerován na konci každého kroku zápisu výsledků. Tento soubor obsahuje veškerá geometrická a fyzikální data, k jejichž změnám došlo v předešlých simulacích.

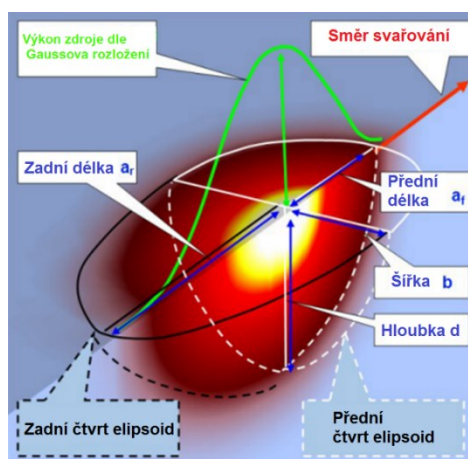
Nastavení trajektorie a velikosti zdroje tepla

Trajektorie definující pohyb svařovacího robota se skládá ze dvou bodů umístěných na hranách plechu v přibližné polovině délky plechu. Koncový bod trajektorie byl vzhledem k protavení přiblížen ke středu o vzdálenost 2,5 mm.



Obrázek 54 – Nastavená trajektorie svařování

Při simulaci byl použit Goldakův model zdroje tepla. Ten má tvar dvoj-elipsoidu a tepelný výkon zdroje je do svarové lázně distribuován dle Gaussovy křivky rozložení.



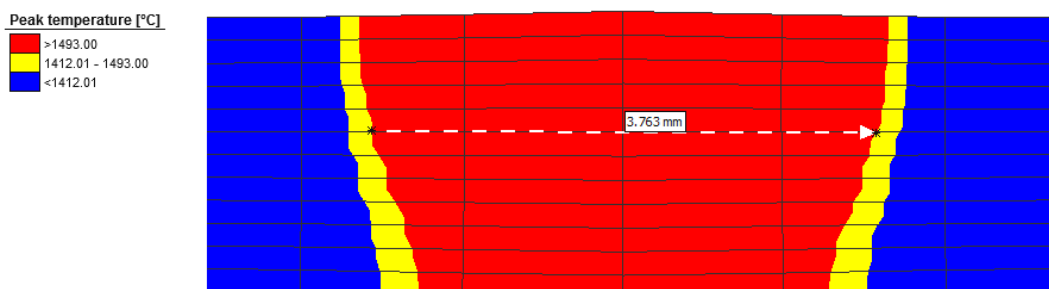
Obrázek 55 – Dvoj-elipsoidový model zdroje tepla [9]

Výchozím zdrojem informací pro určení rozměru a výkonu zdroje tepla byla makrofotografie svaru na obrázku č. 53. Při svařování měl svarový kov šířku 3,7 mm. Pro dosažení stejné šířky svarového kovu v simulacích bylo zapotřebí zvýšit příkon tepla na přibližný dvojnásobek při zachování rychlosti svařování $1,5 \text{ mm.s}^{-1}$. Veškeré použité parametry tepelného zdroje použité při simulacích udává tabulka 10.

Tabulka 10 - Parametry tepelného zdroje

Tepelný příkon do svaru	$Q = 0,48 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
Účinnost svařování TIG k	$k = 0,6$
Efektivní tepelný příkon do svaru	$Q_{\text{ef}} = 0,288 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
Svařovací rychlost	$v = 1,5 \text{ mm.s}^{-1}$
Přední délka oblouku	$a_f = 1,6 \text{ mm}$
Zadní délka	$a_r = 2,2 \text{ mm}$
Šířka	$b = 1,7 \text{ mm}$
Hloubka	$d = 2,0 \text{ mm}$

V průběhu simulací šířka svarové lázně kolísala v rozmezí $3,7 \pm 0,1 \text{ mm}$. Na konci trajektorie došlo k protavení a šířka svarové lázně se zvětšila na 4,8 mm. Oblast mezi solidem a likvidem je zobrazena na obrázku č. 56 žlutou barvu a dosahuje šířky 0,2 mm

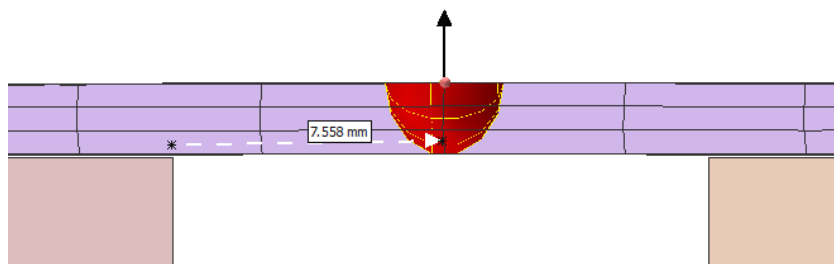


Obrázek 56 – Velikost svarové lázně

Upnutí plechu

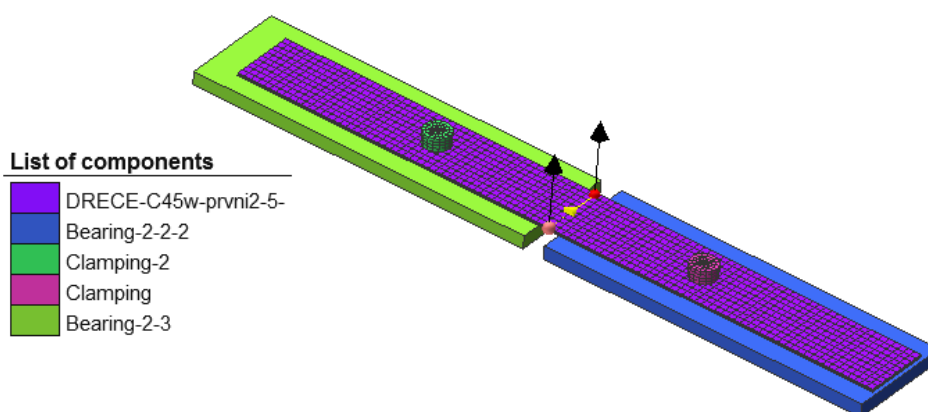
Volba způsobu upnutí svařovaného plechu má významný dopad na výsledné napětí v okolí svaru. K přesnému zapolohování je potřeba užít více svařovacích stolů, které kopírují v co nevyšší přesnosti tvar plechu, který je zdeformovaný průchodem přes DRECE nástroj.

Vzdálenost podpěr od osy svaru je 7,5mm. Konce zpracovaného plechu jsou podloženy fixními podpěrami. Tím kopírují přesně zaoblení a jejich sít konečných prvků kopíruje rastr konečných prvků svařovaného plechu. Umístění je patrné z obrázku 59.

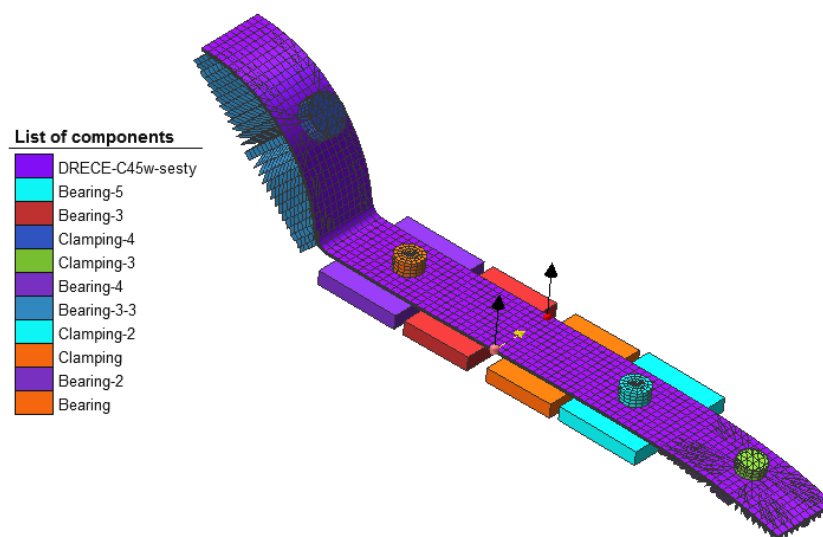


Obrázek 57 – Vzdálenost podpěr od osy budoucího svaru

Svěrky umístěné na povrchu svařovaného plechu mají průměr 20 mm a jsou umístěny 90 mm od osy svaru. Na plech vyvozují sílu o velikosti 100 N a jejich tuhost je $200 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$.



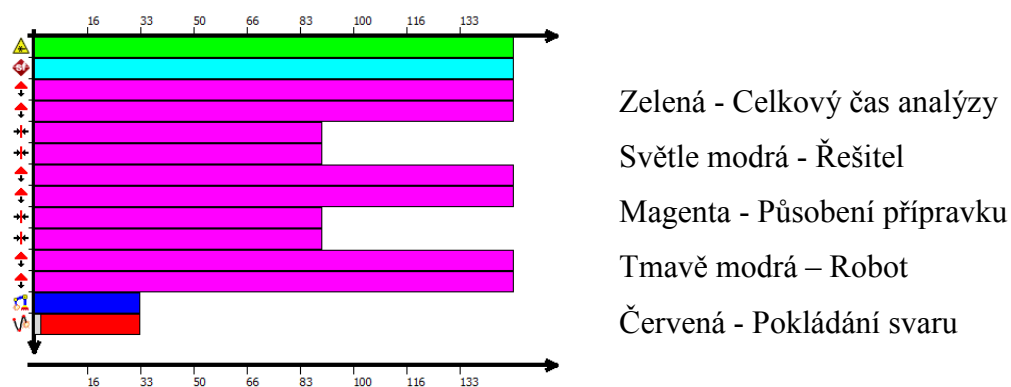
Obrázek 58 – Upnutí nezpracovaného plechu



Obrázek 59 – Upnutí plechu zpracovaného v nástroji DRECE

Nastavení časování

Délka prodlevy pohybu na začátku trajektorie byla totožná s reálným experimentem, tedy 2s. Svěrky byly po 90 sekundách od startu svařování odstraněny. Celkový čas výpočtu je nutné volit tak aby zahrnoval i čas nutný pro ochlazení součásti. Celkový čas výpočtu měl délku 150 sekund, přičemž samotný proces svařování trval 31,6 sekund.



Obrázek 60 – Graf času

Parametry tepelné výměny s okolím

Parametry tepelné výměny byly ponechány na výchozích hodnotách.

Tabulka 11 – Parametry tepelné výměny

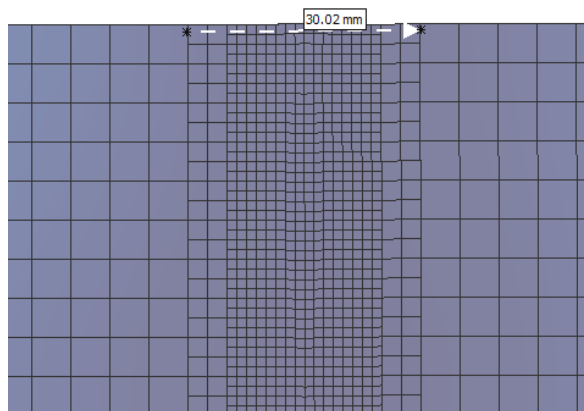
Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota okolí	20	[°C]
Součinitel tepelné výměny s prostředím	20	[W.(m ² .K) ⁻¹]
Součinitel tepelné výměny s přípravky	1000	[W.(m ² .K) ⁻¹]
Sálání do prostředí	0,25	

Pokročilé nastavení procesu

Při simulacích byl použit řešitel (solver) simufact. Krok výpočtu byl adaptibilní a jeho hodnota byla volena automaticky řešitelem. Součinitel tření geometrií o sebe byl 0,3. Výpočet zahrnoval řešení fázových transformací a tenzoru deformací. Pro vytvoření grafů byly do osy plechu umístěny snímané body a to až do vzdálenosti 55 mm od osy svaru. Do vzdálenosti 10 mm od osy svaru byla rozteč 1,66 mm a od vzdálenosti 10 mm byla rozteč 5 mm.

Nastavení zjemnění sítě

Zjemnění sítě konečných prvků ve svaru zvyšuje přesnost výpočtu, ale má za následek prodloužení doby simulace. Definuje se úroveň zjemnění vůči původní síti konečných prvků a velikostí oblasti, ve které dojde ke zjemnění. Pro simulaci svařování plechu byla nastavena 2. úroveň zjemnění a velikost oblasti 5 x větší než zdroj tepla. Výsledná oblast zjemnění měla šířku 30 mm.



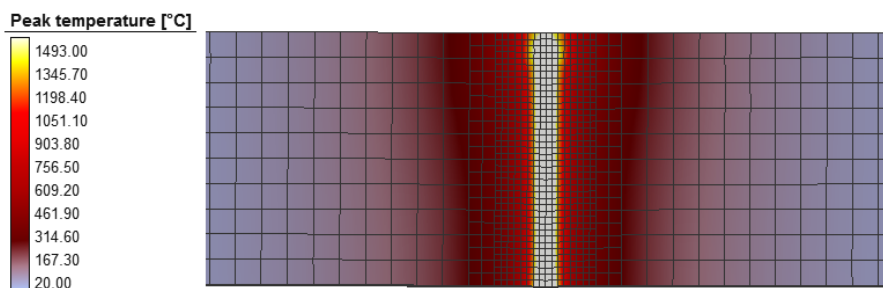
Obrázek 61 – Nastavení zjemnění sítě konečných prvků

6.3 Výsledky simulace svařování

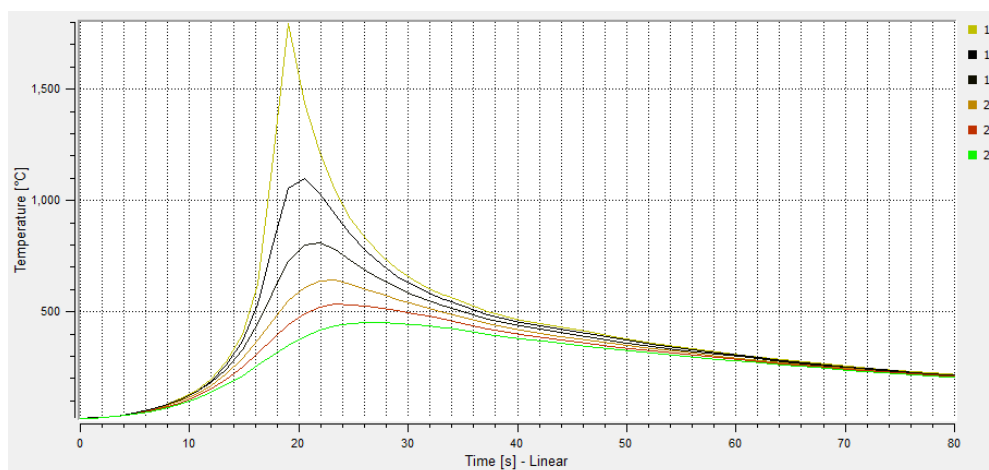
Zobrazené obrázky zobrazují stav na konci ochlazování, které bylo ukončeno po 150 sekundách od začátku svařování. Také veškeré grafy zobrazují stav na konci ochlazování a snímané body jsou umístěny na vrchní straně plechu v jeho podélné ose. Tedy v ose kolmé na osu svaru.

6.3.1 Teplotní analýza

Dosažené teploty při svařování plechu ve výchozím stavu i po zpracování byly totožné. Na konci plechu došlo k rozšíření svarové lázně důsledkem nižší rychlosti odvodu tepla ze svaru. Nejvyšší teplota na konci ochlazování po 150 sekundách byla 77,7 °C. Čas ochlazování $t_{8/5}$ ve středu svaru byl 9,5 sekundy.



Obrázek 62 – Plech upravený DRECE 6x - Dosažená teplota v průběhu svařování

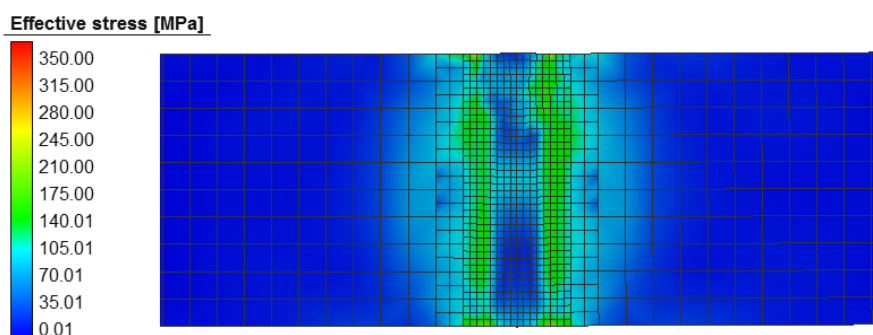


Obrázek 63 – Plech upravený DRECE 6x - Teplotní cyklus

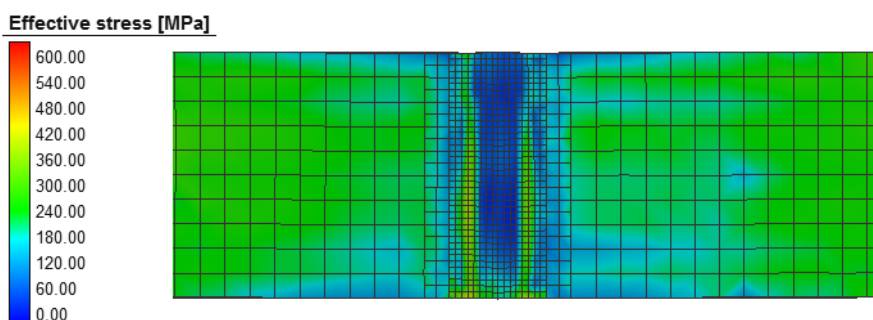
(vzdálenost bodů od osy svaru: 17 – 1,66 mm, 18 – 3,3 mm, 19 – 5 mm, 20 – 6,66 mm, 21 – 8,33 mm, 22 – 10 mm)

6.3.2 Napětíová analýza

Ve zpracovaném plechu došlo v oblasti svaru k poklesu napětí, které bylo do plechu vneseno průchodem přes DRECE nástroj. Hodnota intenzity napětí ve svaru zpracovaného plechu je víceméně totožná jako u plechu s výchozí strukturou. Nejvyšších hodnot napětí je dosaženo v teplem ovlivněné oblasti.

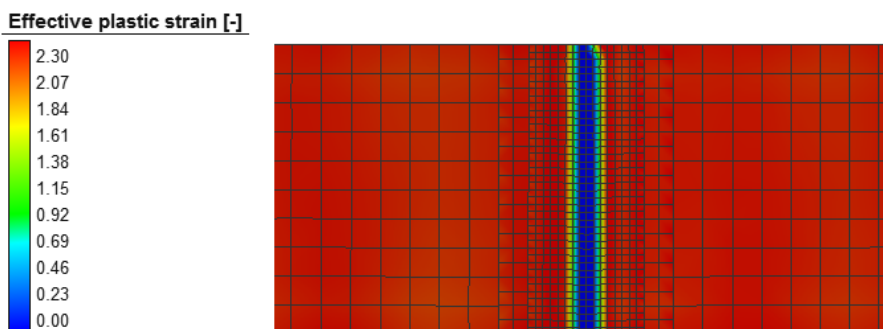


Obrázek 64 – Nezpracovaný plech – Intenzita napětí



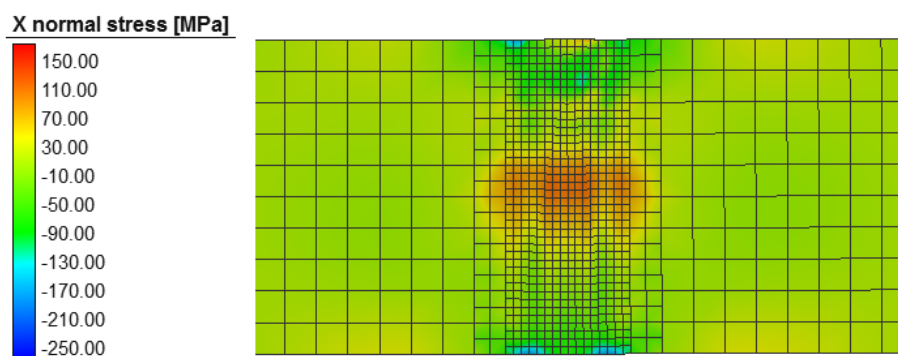
Obrázek 65 – Plech upravený DRECE 6x – Intenzita napětí

Důsledkem svařování byl pokles získané intenzity deformace na nulovou hodnotu (viz. obr. 66). K tomu došlo vlivem roztavení kovu. V oblasti částečného natavení dochází k navyšování hodnot intenzit deformace až na původní hodnoty.

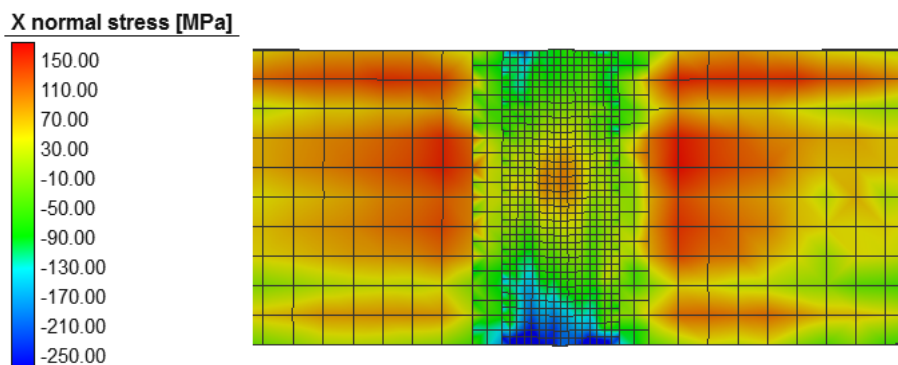


Obrázek 66 – Plech upravený DRECE 6x – Intenzita deformace

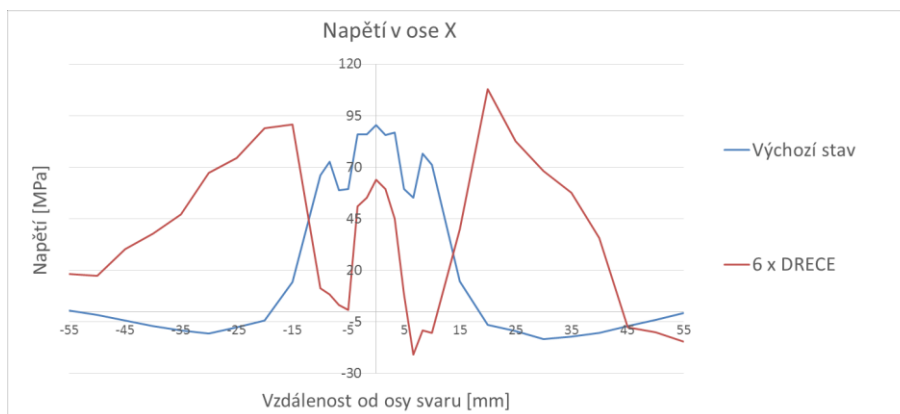
Průběh napětí v ose X u zjemněného plechu byl značně ovlivněn velikostí elementu sítě konečných prvků. Mezi jemnou a hrubou sítí došlo k velkému skoku hodnot napětí. Svarový kov zpracovaného plechu ovšem vykazuje nižší napětí o 30 MPa oproti plechu s výchozí strukturou. Zbytkové napětí v ose X u plechu s výchozí strukturou dosahuje ve středu svarového kovu hodnot 85 MPa a u zpracovaného plechu 55 MPa. V oblasti částečného natavení ve vzdálenosti 5 mm dochází k poklesu hodnot napětí.



Obrázek 67 – Nezpracovaný plech – Zbytkové napětí v ose X
(osa kolmá ke svaru)

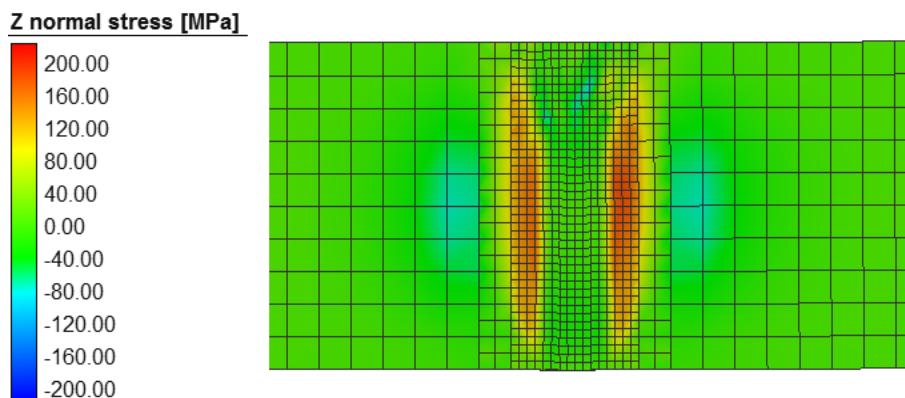


Obrázek 68 – Plech upravený DRECE 6x – Zbytkové napětí v ose X
(osa kolmá ke svaru)

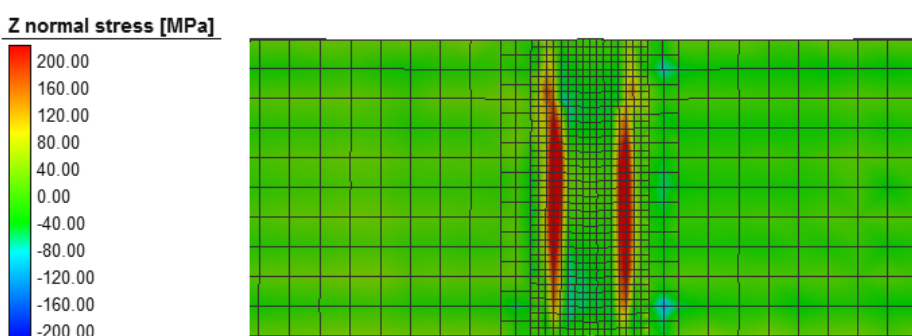


Obrázek 69 – Průběh napětí v ose X

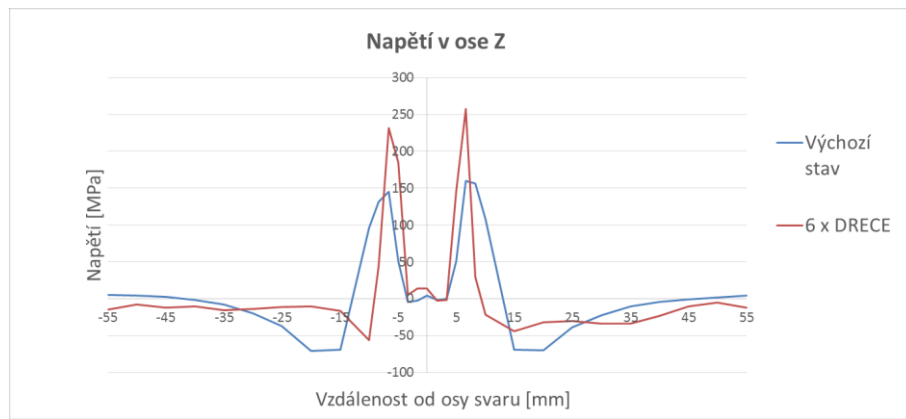
Nejvyšších hodnot napětí v ose Z bylo dosaženo v teplem ovlivněné oblasti. Oproti plechu s výchozí strukturou došlo v plechu se zjemněnou strukturou k šířkové koncentraci zbytkového napětí v ose Z a k nárůstu maximálního napětí o více jak 100 MPa.



Obrázek 70 – Nezpracovaný plech – Zbytkové napětí v ose Z
(osa rovnoběžná se svarem)



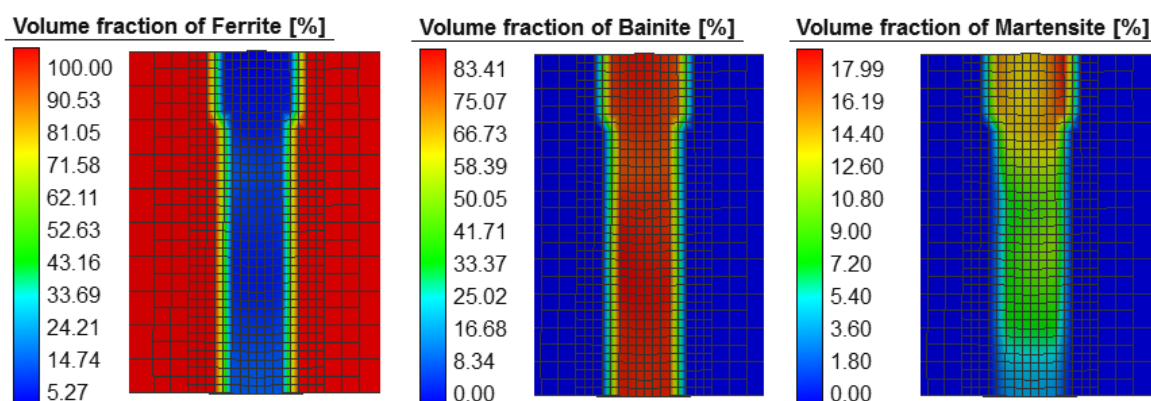
Obrázek 71 – Plech upravený DRECE 6x – Zbytkové napětí v ose Z
(osa rovnoběžná se svarem)



Obrázek 72 – Průběh napětí v ose Z

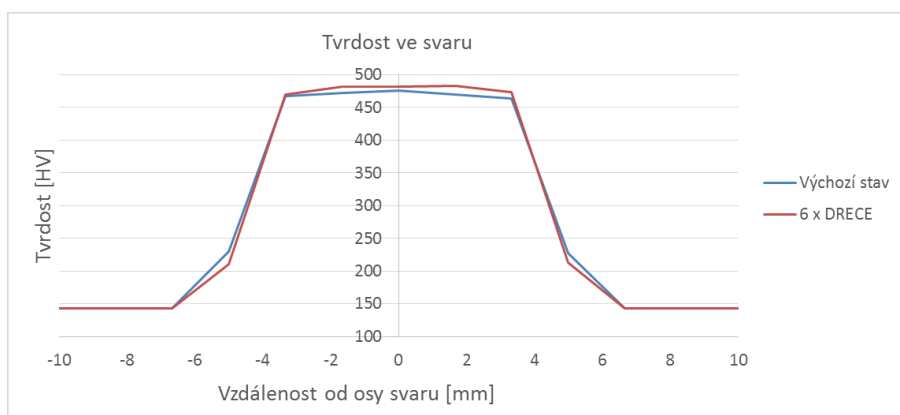
6.3.3 Strukturní analýza

Výsledky strukturní analýzy jsou závislé na zadaném CCT diagramu (viz. obr. č. 19) a na rychlosti ochlazování. Základní materiál je tvořen feritickou maticí. Svarový kov je tvořen směsí bainitu, martenzitu a feritu přičemž asi 81 % tvoří bainit a 10 % ferit a 9 % martenzit. Tento poměr není konstantní. Největší odchylky jsou v obsahu feritu a martenzitu. Na začátku trajektorie je struktura tvořena přibližně 80% bainitu, 5 % martenzitu a 15% feritu. Na konci trajektorie struktura obsahuje přibližně 81% bainitu, 14% martenzitu a 5 % feritu. Různý poměr struktur je dán různou rychlostí ochlazování.



Obrázek 73 – Plech upravený DRECE 6x – Obsah strukturních fází

Tvrdość, jenž je závislá na obsahu tvrdých bainitických a martenzitických struktur, dosahuje u obou plechu přibližně stejných hodnot 480 HV. Ve vzdálenosti 3,3 mm od osy svaru se projevuje pokles tvrdosti, který se zastaví až ve vzdálenosti 6,3 mm na původní hodnotě 143 HV.



Obrázek 74 – Průběh tvrdosti ve svaru

6.4 Vyhodnocení simulací svařování

Oproti svařování na reálných vzorcích byly simulace provedeny s několika změnami. První změnou je způsob svařování. Bylo nutné provést pouze protavení svařovaného plechu, jelikož simulační program nedokáže rozdělit zpracováváný plech na více částí bez ovlivnění struktury materiálu, tak jak to v reálném prostředí dokáže třískové obrábění. Druhou úpravou bylo zvýšení příkonu zdroje tepla. Pro dosažení stejné velikosti svarové lázně bylo nutné zvětšit přibližně dvojnásobně množství přivedeného tepla. Nutnost tohoto navýšení byla pravděpodobně ovlivněna vstupními parametry svařovaného materiálu.

Výsledkem teplotní analýzy jsou křivky teplotního cyklu jednotlivých snímaných bodů. Rychlost ochlazování svarového kovu je $t_{8/5} = 9,5\text{s}$ a teplem ovlivněná oblast zasahuje do vzdálenosti 6 mm od osy svaru.

Napěťová analýza potvrdila významný vlivu velikosti elementu na dosažené napětí. Především na napětí v ose X. Zvýšené napětí se projevuje v přechodu mezi zjemněnou sítí a sítí s výchozím rozměrem elementů. Zbytkové napětí v ose X u plechu s výchozí strukturou dosahuje ve středu svarového kovu hodnoty 85 MPa a napětí u zpracovaného plechu hodnoty 55 MPa. Napětí v ose Z ve středu svaru u plechu s výchozí strukturou dosahuje hodnot 5 MPa a u zpracovaného plechu 14 MPa. Oblast částečného natavení u zpracovaného plechu vykazuje prudký nárůst zbytkového napětí v ose Z o víc jak 100 MPa oproti výchozímu plechu.

Konečná struktura ve svaru po ochlazení obsahuje při nastavených parametrech zdroje velký obsah tvrdých struktur, především bainit (80%) v menším obsahu martenzit a ferit. To má za následek vysokou tvrdost ve svarovém kovu 480 HV.

Nastavený zdroj tepla tepelně ovlivní základní materiál do šířky 6,5 mm od osy svaru.

7. Verifikace výsledků simulací s experimentem

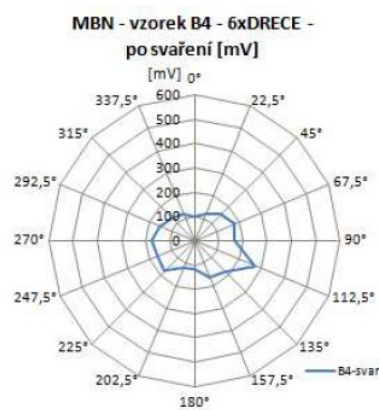
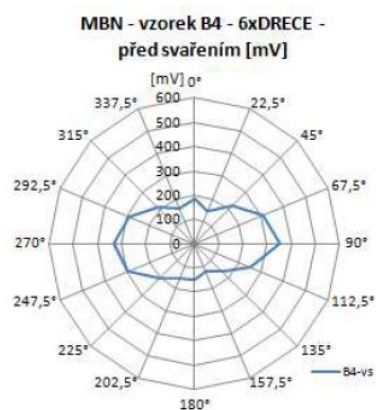
Zpracovávané plechy o rozměru 48 x 2 x 1000 mm byly upraveny nástrojem DRECE při 6 opakováních a následně rozřezány a svařeny. Pro dosažení co nejmenšího tepelného ovlivnění byla pro svaření použita metoda svařování TIG v pulzním režimu. Z několika svařených plechů ve výchozím stavu byl vybrán plech z označením A2 a ze zjemněných plechů vzorek B4. Takto svařené plechy byly podrobeny testům ke zjištění velikosti zbytkových napětí. Měření bylo provedeno využitím měření Barkhausenova magnetického šumu. Následně byly vzorky rozřezány a podrobeny sérií testů pro zobrazení makrostruktury a mikrostruktury svarů a měření mikro tvrdosti.

7.1 Zbytkové napětí

Měření zbytkového napětí bylo provedeno mřížkovou a polární metodou. Výsledkem měření jsou hodnoty v mV, které ukazují poměr mezi tlakovým a tahovým napětím v materiálu a jejich rozložením. Pokles hodnot mV signalizuje vnesené tlakové napětí a zvýšené napětí signalizuje vznik tahových napětí. Polární měření ukazuje, že vliv průchodu přes DRECE nástroj zapříčinil vznik tlakových napětí, které jsou ve směru pohybu materiálu (osa X) větší než ve směru kolmém na něj (osa Z). Vznik tlakových sil má příznivý vliv na svařitelnost oceli a zmenšuje pravděpodobnost vzniku studených trhlin.

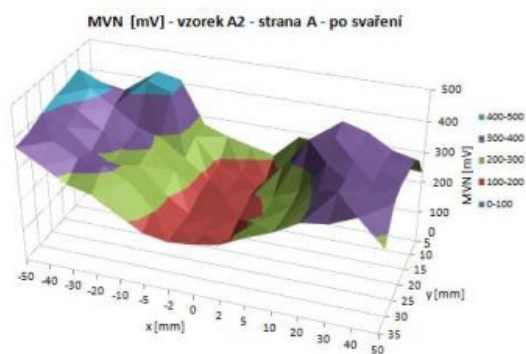


Obrázek 75 – Vzorek A2 - Polární měření zbytkového napětí [7]

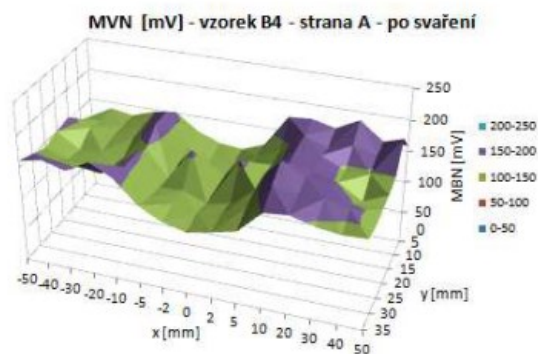


Obrázek 76 – Vzorek B4 - Polární měření zbytkového napětí [7]

Při měření zbytkových napětí na horní ploše se projevil důsledek svařování vznikem tlakových sil ve svarovém kovu. Šířka materiálu napětově ovlivněného průchodem je u plechu zpracovaném v DRECE zařízení užší než ve výchozím stavu.



Obrázek 77 – Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku A2 po svaření [7]



Obrázek 78 - Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku B4 po svaření [7]

7.2 Šířka teplem ovlivněné oblasti a mikrostruktura svaru

Pomocí fotky makrostruktury svaru byly zjištěny přibližné šířky teplem ovlivněné oblasti. Naměřené hodnoty jsou v tabulce č. 12.

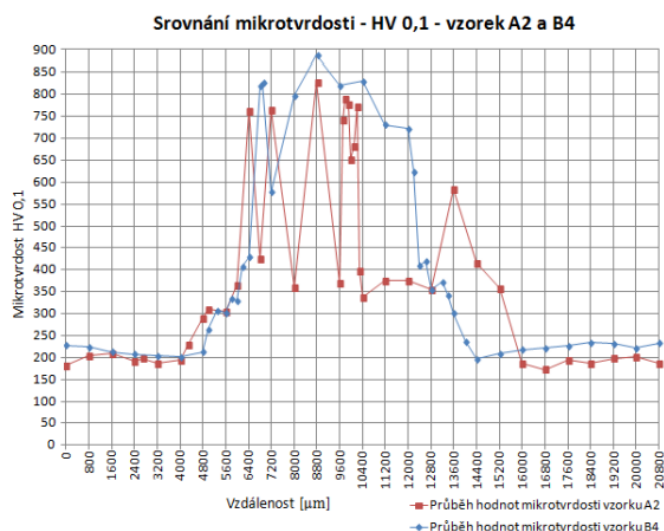
Tabulka 12 – Šířka TOO [7]

Šířka	Vzorek A2	Vzorek B4
Svarového kovu	3,5	3,7
Přehřáté hrubozrnné oblasti	1,5	1
Mezi hrubozrnnou oblastí a neovlivněným materiálem	2	1,2
Celková šířka TOO svaru i se svarovým kovem	8,5	8,1

Základní, teplem neovlivněný materiál byl tvořený sferoidizovaným perlitem. Oblast částečné překrystalizace a normalizace obsahovaly ferit a perlit. Přehřátá oblast obsahovala hrubá zrna martenzitu, sferoidizovaný cementit a desky terciálního cementitu. Svarový kov byl tvořen hrubozrnnou martenzitickou strukturou s vyloučeným terciálním cementitem na hranicích zrn.

7.3 Měření mikrotvrdomosti

Oba dva rozřezané a naleptané vzorky byly podrobeny zkoušce tvrdosti dle Vickerse HV 0,1. Vzdálenost mezi jednotlivými vpichy byla 0,8 mm. Vlivem vícenásobné plastické deformace v DRECE nástroji se průměrná tvrdost navýšila z původních 186 na 225 HV 0,1. Svarový kov a přehřátá hrubozrnná oblast obsahují dvě základní struktury s velmi rozdílnými tvrdostmi. Martenzit s tvrdostí kolem 400 HV 0,1 a terciální cementit s tvrdostí do 800 HV 0,1.



Obrázek 79 – Mikrotvrdomost HV 0,1 [7]

8. Diskuze dosažených výsledů

Zpracovávaným materiálem byl plech o rozměrech 50 x 2 x 500 mm. Nejvhodnějším ekvivalentem k oceli C55E použité v experimentu byla ocel C45, která ale měla definované parametry pouze do teploty 1000°C. Bylo nutné provést doplnění zbývajících hodnot až do teploty 1300°C, která je limitem pro použití při svařování.

Simulace vícenásobné plastické deformace v DRECE zařízení potvrdila předpoklad použitelnosti pouze sítě konečných prvků typu SheetMesh, jejíž prvky mají tvar šestistěnu. Síť sIMeshTetra jenž je vhodná k simulování samotné deformace v nástrojích, ale není vzhledem k výsledným hodnotám napětí v jednotlivých osách vhodná pro použití při svařování.

Výsledkem simulace SPD zpracování je plech s akumulovanou deformací o velikosti 2,3. Napětí v osách X a Z při použití síťování Sheetmesh po šesti průchodech vykazovalo vnesení tlakových napětí o velikostech $\sigma_x = -120 \pm 20$ MPa a $\sigma_z = -45 \pm 15$ MPa.

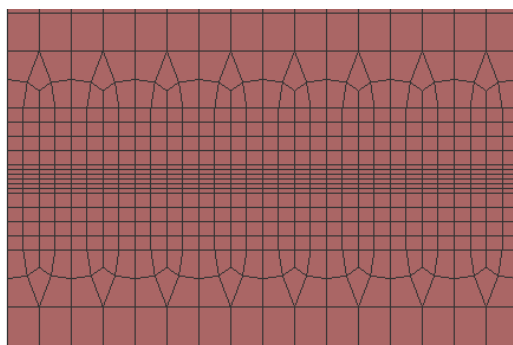
Při simulování svařování bylo nutné vložit do svaru oproti reálnému procesu TIG v pulzním režimu, asi dvojnásobně větší množství tepla, tak aby bylo dosaženo stejně široké svarové lázně jako v reálném experimentu. Dominantní vliv na nutnost vložení vyššího tepelného příkonu mají především vložené materiálové parametry a nastavené teplotní vazby.

Požadovanými výsledky svařovacích simulací byly teplotní cykly, se kterými souvisí změny struktury při svařování. Důsledkem dosažené rychlosti ochlazování vznikla ve svaru tvrdá bainitcko-martenzitická struktura o tvrdosti 480 HV. Při experimentu byla změřena pouze mikrotvrdost v jednotkách HV 0,1. Průměrná hodnota tvrdosti v jednotkách HV by měla být umístěna v rozmezí minimálních a maximálních naměřených hodnot v jednotkách HV 0,1. Tato tvrdost by tedy měla odpovídat reálným parametrům.

Při reálném experimentu došlo k ovlivnění tvrdosti v šířce 11,8 mm, při simulacích v šířce 12,6 mm. Daný rozdíl může být způsoben především zadanými teplotními vlastnostmi základního materiálu a nepřesností v zadávání velikosti zdroje tepla.

Intenzita deformace se vlivem překrystalizace při svařování v oblasti nad teplotou austenitu, která je u ocele C45 880°C, snižuje na nulu. Šířka oblasti s nulovou intenzitou deformace je tedy stejná, jako šířka oblasti nad teplotou A_{c3} .

Napětí v jednotlivých osách je významně ovlivněno velikostí elementu sítě konečných prvků a především způsobu jeho navázáním na element s větším rozměrem. Daná výchozí síť s jednotnou velikostí elementu vytvořená v programu Simufact.forming je nevhodná pro přenos sil z jemné sítě vzniklé průchodem zdroje tepla na větší elementy. Mnohem vhodnější by bylo převedení projektu do podprogramu Simufact.mesh simlab, který by upravil původní síť a předpřipravil na průchod zdroje tepla podobně, jak je zobrazeno na obrázku č. 80. Jelikož v tuto chvíli není k dispozici licence na tento podprogram, není možné ověření těchto předpokladů na simulacích.



Obrázek 80 – Ukázka síťování v programu Simufact.mesh [9]

Z hodnot lze však vypočítat vliv zpracování vícenásobnou plastickou deformací na dosažené hodnoty napětí. Zbytkové napětí ve směru osy X u plechu s výchozí strukturou dosahuje ve středu svarového kovu hodnoty 85 MPa a u zjemněného plechu hodnoty 55 MPa. Došlo tedy k poklesu o 30 MPa. Napětí v ose Z ve středu svaru u plechu s výchozí strukturou dosahuje hodnot 5 MPa a u zpracovaného plechu 14 MPa. Ve středu svarového kovu došlo tedy ke zvýšení hodnot napětí ze záporných tlakových napětí do kladných tahových napětí.

9. Závěr

Diplomová práce se zabývá simulováním zpracování vícenásobnou plastickou deformací plechu z vysokouhlíkové oceli v nástroji DRECE s následnou simulací svařování takto zpracovaného plechu.

Teoretická část diplomové práce popisuje počítačové programy vhodné pro simulování tvářecích a svařovacích procesů. Z těchto simulačních programů jsou využity pro simulování programy Simufact.forming a Simufact.welding od německé společnosti Simufact Engineering GmbH. Dále jsou popsány technologie a materiály použité při simulacích.

Experimentální část se věnovala samotnému simulování procesu DRECE v programu Simufact.forming s následným převedením výsledků do programu Simufact.welding. V něm proběhlo provaření upraveného plechu a nezpracovaného plechu s výchozími vlastnostmi. Byl zjištěn významný vliv velikosti elementu sítě konečných prvků na dosažené napětí v ose X.

V diplomové práci byla prokázána proveditelnost těchto simulací a bylo zjištěno, jaké měřitelné charakteristiky nám dovolí programy predikovat. V budoucím navázání na tuto práci by bylo vhodné zaměřit se na vstupní data zpracovaného materiálu a na řešení problematiky velikosti elementu sítě konečných prvků a jejich navázání na původní hrubou síť.

Diplomová práce obsahuje dvě přílohy popisující tvorbu projektu zařízení DRECE v simulačním programu Simufact.forming 12 a tvorbu projektu svařování takto zpracovaného plechu v programu Simufact.welding 4.0. Tyto přílohy slouží jako zdroj informací pro budoucí rozvíjení tohoto tématu.

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Vladislavu Ochodkovi, za jeho cenné rady při řešení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Kedroňovi, Ing. Michalovi Salajkovi a Bc. Martinu Rejzkovi za jejich rady při řešení simulací.

10. Seznam použité literatury

- [1] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [2] PETRUŽELKA, Jiří. *TEORIE TVÁŘENÍ I* [online], 3. verze, 185 s., 2010 [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TTI10.pdf>
- [3] DAVID, S. *Trends in welding research: proceedings of the 8th International Conference*, June 1-6, 2008, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA. Materials Park, OH: ASM International, c2009, s. 322-324. ISBN 1615030026.
- [4] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 165 s.
- [5] V. Michenka, S. Rusz, M. Gottwald, K. Malaník, J. Kedroň, S. Tylšar, *Evaluation of DRECE forming process of Cu-based alloys and proposal of testing method for evaluation of UFG materials micro-structural stability*, Transactions of the VŠB, Technical University of Ostrava, Mechanical Series, Vol. LVI, No. 2, 2010, 131-142.
- [6] KEDROŇ, J. *Simulace protlačování slitin AlMn1Cu a AlFe1,5Mn klasickým a upraveným nástrojem ECAP*. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 70 s., Diplomová práce, vedoucí: Rusz, S.
- [7] BOXAN, P. *Hodnocení vybraných vlastností svarového spoje nízkouhlíkové oceli zpracované vícenásobnou plastickou deformací : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2013, 38 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

- [8] COMAT 2012[i], *2nd International Conference on Recent Trends in Structural Materials*, Nov 21st - 22nd, Tanger s.r.o., Plzeň, Czech Republic, ISBN 978-80-87294-34-5.
- [9] *Simufact.welding* [počítačový program]. Ver. 4.0.2. Hamburk, květen 2015.
- [10] *Lexikon technických materiálů 3.0* [počítačový program], srpen 2003.
- [11] Simufact.welding: Product presentation. In: *Simufact* [online]. 2013 [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: http://www.simufact.de/en/solutions/Praesentation_wel/simufact_welding_3_1_en_web.pdf.
- [12] LENFELD, Petr. SW PRO INŽENÝRSKÉ APLIKACE. In: *Technická univerzita v Liberci - Katedra strojírenské technologie - oddělení strojírenské metalurgie* [online]. 2010 [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/aktivita/sw.pdf>.
- [13] *LEADING EDGE MECHANICAL - TIG Welding* [online]. c2011, [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.leadingedgemech.com/welding/Tig/tig.html>.
- [14] Steel C55E/1.1203. BRESLAVSKY, Dmitry. NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY KHPI. *SteelNumber: European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. 2015 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=323.
- [15] Steel C45/1.0503. BRESLAVSKY, Dmitry. NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY KHPI. *SteelNumber: European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=152.
- [16] Oyal Metal: CK55. *Oyal Metal* [online]. 2011 [cit. 2015-3-12]. Dostupné z: <http://www.oyalmetal.com/tabllolar/366-ck55.html>
- [17] VrWeld [online]. 2014 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://goldak-vrweld.com>.

- [18] FormFEM Software. *ITA technology & software* [online]. 2007 [cit. 2015-03-15].
Dostupné z: <http://www.ita-tech.cz/en/products-services/fem-computer-simulations/bulk-forming>

11. Seznam příloh

Příloha A - Tvorba projektu zařízení DRECE v programu Simufact.forming 12

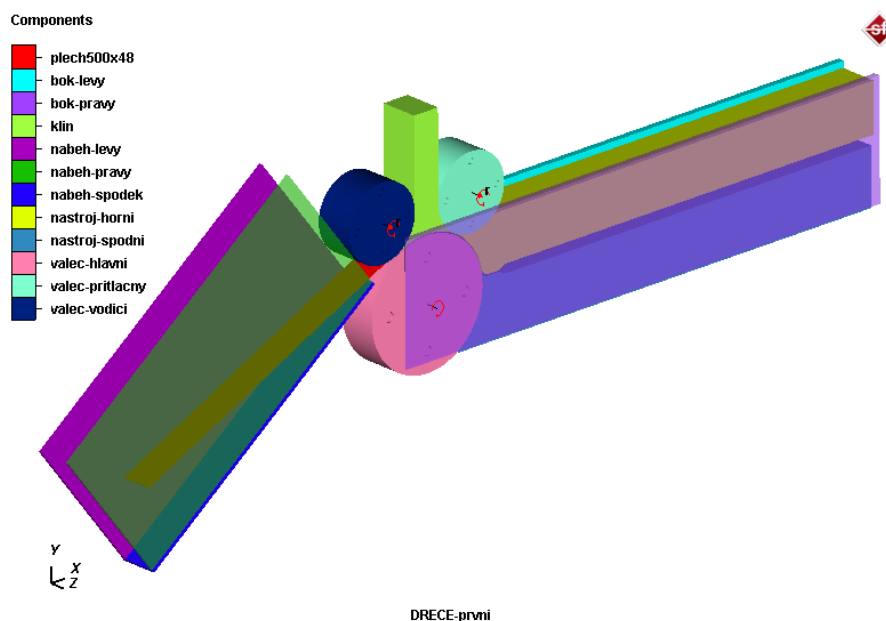
Příloha B - Tvorba projektu svařování plechu zpracovaného pomocí DRECE zařízení
v programu Simufact.welding 4.0

Příloha A - Tvorba projektu zařízení DRECE v programu Simufact.forming 12

Tato příloha slouží jako návod k vytvoření numerické simulace zpracování plechu v zařízení DRECE v simulačním programu Simufact.forming 12.0.1. Od uživatele se požaduje vlastnictví souborů s geometrií zařízení DRECE.

Je zapotřebí znát určitá omezení a ulehčení oproti reálnému procesu:

- Úprava geometrie tvářecích nástrojů - zvětšení poloměru na 10 mm
- Použití bočních lišt pro zamezení vybočení plechu ze směru pohybu a zachování šířky plechu
- Použití naváděcích prvků pro navedení plechu mezi vodící a hlavní válec
- Všechny části DRECE zařízení jsou ze stejného materiálu X40CRMov5-1



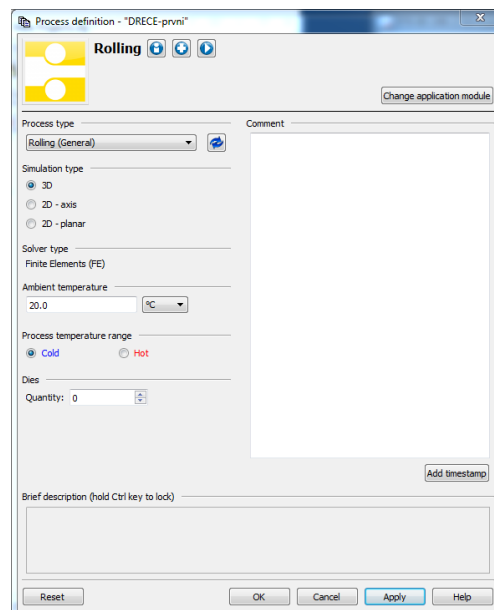
Sestavení modelu

Typ procesu vybíráme: Rolling.

*File → New project → Rolling → OK →
Rolling general, 3D, 20°C, Cold, Dies 0 → OK*

Pojmenujeme vytvořený strom procesu na
DRECE-první a uložíme vytvořený project:

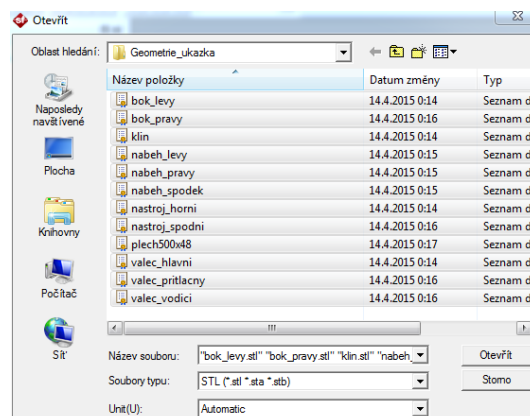
Save project as → ...



Geometrie

Geometrie, které jsou již předpřipravené,
vložíme do inventáře:

*Insert → Geometry → CAD preview a
vybereme soubory geometrie → Use
filenames → Import*



Definice materiálu pro nástroje

Materiál pro nástroje vybereme ze základní databáze programu:

Insert → Material → Library → ToolSteel → X40CRMoV5-1_h

✚ Definice materiálu polotovaru

Materiál plechu musí být definovaný minimálně pro práci za studena tedy v rozmezí teplot od 293 - 573 K, pokud chceme s výsledky simulací dále pracovat v programu Simufact.welding materiál musí být určen pro svařování a poznáme je příponou – sw. Těchto materiálů je v základní databázi jen 28.

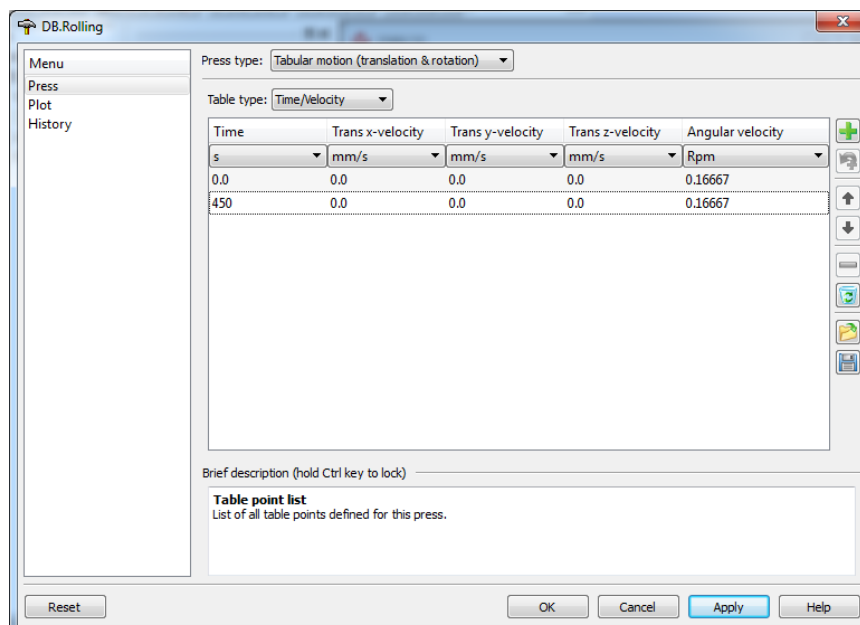
Insert → Material → Library → General steel → DB.C45-HT_jmat

Material	DIN	AISI	Weldability
16MnCr5-SPM_sw	1.7131		yes
20MnCr5-MPM_sw	1.7147		yes
22MnB5-JMP-MPM_sw	1.5528		yes
316LNSPH-2_sw	1.4406		yes
A6XXX-PITYPE10-PSD_sw			yes
A6XXX-PITYPE10-PSD_sw			yes
A7XXX-PITYPE12-Iso_sw			yes
A7XXX-PITYPE12-Iso_sw			yes
AA4XX-PITYPE4-Iso_sw			yes
AA4XX-PITYPE4-Iso_sw			yes
Al99-5-sw-2			yes
AlMg3Mn-PITYPE1_sw			yes
AlMg3Mn-PITYPE1_sw			yes
AlMgSi05-T4_sw	3.3206	6060	yes
Cu-sw			yes
DC04-JMP-MPM_sw	1.0338		yes
G2Si1-JMP-MPM-sw			yes
H400_sw	1.0556		yes
P91-MPM-sw	1.4903		yes
S235-JMP-MPM_sw			yes
S235-JMP-MPM-sw			yes
S355J2G3-MPM-sw	1.0570		yes
S355J2G3-SPM-sw	1.0570		yes
S690QL-JMP-MPM_sw	1.8928		yes
S690QL-SPM-sw			yes
TIA16V4-SPM-sw			yes
X5CrNi18-10_sw	1.4301		yes

✚ Definice stroje

Insert → Press → Manual → Tabular motion

Přidáme dva časové body v časech 0 a 450 a rychlosti otáčení 0.16667Rpm. Konečný čas se volí dle délky zpracovávaného materiálu. Pro plech délky 500mm postačuje délka činnosti stroje 450s. Stroj přejmenujeme na *DB.rolling*



✚ Definice parametru tření

Proces obsahuje 3 rozdílné velikosti tření. Vždy volíme automatický model.

Válce – Zpracováváný materiál

Insert → Friction → Manual → Automatic: 0,65 → Die wear: Constant (Rockwell) 50

Nástroje – Zpracováváný materiál

Insert → Friction → Manual → Automatic: 0,1 → Die wear: Constant (Rockwell) 50

Pomocné prvky – Zpracováváný materiál

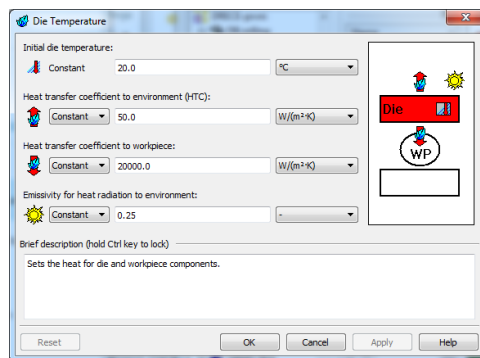
Insert → Friction → Manual → Automatic: 0 → Die wear: Constant (Rockwell) 50

Parametry tepelné výměny

Pro nástroje

Insert → Heat → Die → Manual →

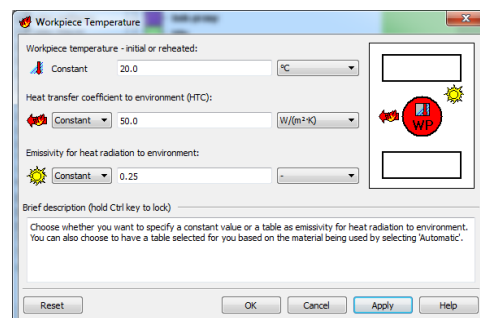
- Počáteční teplota 20°C
- Součinitel tepelné výměny s prostředím 50 W/(m².K)
- Součinitel tepelné výměny s tvářeným materiálem 20 000 W/(m².K)
- Sálání do prostředí 0.25



Pro polotovary

Insert → Heat → Workpeace → Manual →

- Počáteční teplota 20°C
- Součinitel tepelné výměny s prostředím 50 W/(m².K)
- Sálání do prostředí 0.25



Nastavení přitlaku válců

Přítlak vodícího válce

Insert → Boundary condition → Manual → Apply force → In Y 0,08 kN

Přítlak přítlačného válce

Insert → Boundary condition → Manual → Apply stress → Normal stress 140 MPa

Ustavení nástrojů a polotovaru

Nejdříve vložíme do stromu procesu stroj DB.Rolling a poté klikneme pravým tlačítkem (PTM) na DRECE-první ve stromu procesu a vybereme:

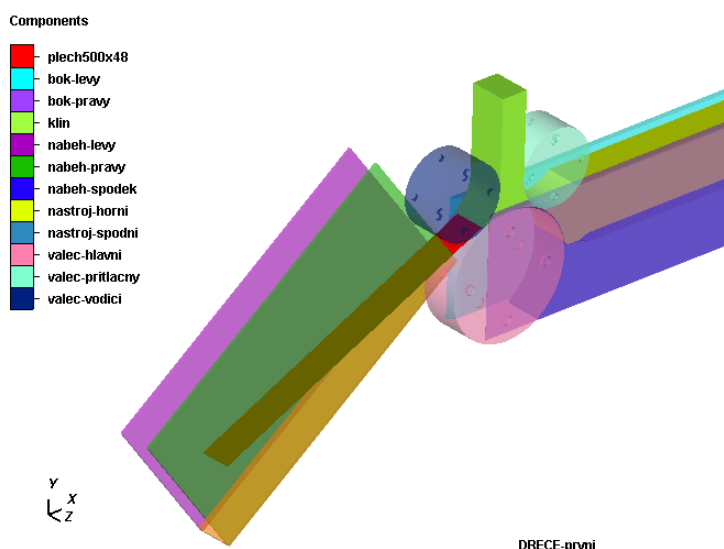
Insert → Dies → from existing geometries:

- *Default type: Rigid die without heat conduction*
- *Default press: DB.rolling*
- *Vybereme všechny prvky kromě zpracovávaného polotovaru a k válcům přiřadíme vazbu na stroj DB.Rolling*

Po převedení všech prvků ve stromu procesu a přetáhnutí plechu do Workpiece, přiřadíme ke každému jeho třecí, materiálové a teplotní vazby a k válcům přítlak.

Vzorek umístíme mezi válce. Boční vedení vzorku při zavádění mezi válce je zajištěno přidáním 3 plechů, které budou mít za úkol zajištění vzorku proti jeho vychýlení z osy Z. Spodní plech má rozměr 60 x 500 x 5 mm a boční stěny 500 x 250 x 5 mm. Boční plechy přisuneme k zpracovávanému polotovaru pomocí funkce „**Align Bounding box**“.

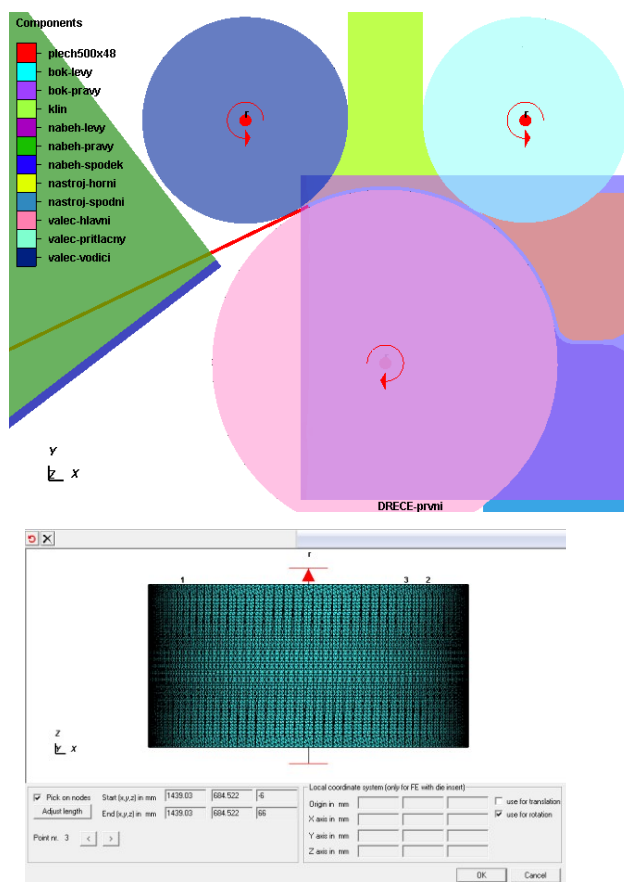
Průchod zpracovávaného plechu před válce je z bočních stran zajištěn přidáním dvou plechu (bok-pravy, bok-levy). Jejich umístění v ose Z je dáno šířkou plechu a umísťují se tak, aby se dotýkaly ZP již na začátku procesu.



Nastavení os rotace válců


Vždy zvolíme tři body ve stejné výšce na válcovité ploše. Vybereme směr otáčení a zaškrtneme pouze pro rotaci.

PTM na požadovaný válec v Inventáři → Rotation axis/local system



Sít konečných prvků

Volba sítě konečných prvků má největší vliv na výsledné vlastnosti po zpracování. Proces dovoluje použití několika druhu sítí. Výchozí a nejméně problematickou je Sheetmesh. Velikost elementu je maximálně 5mm.

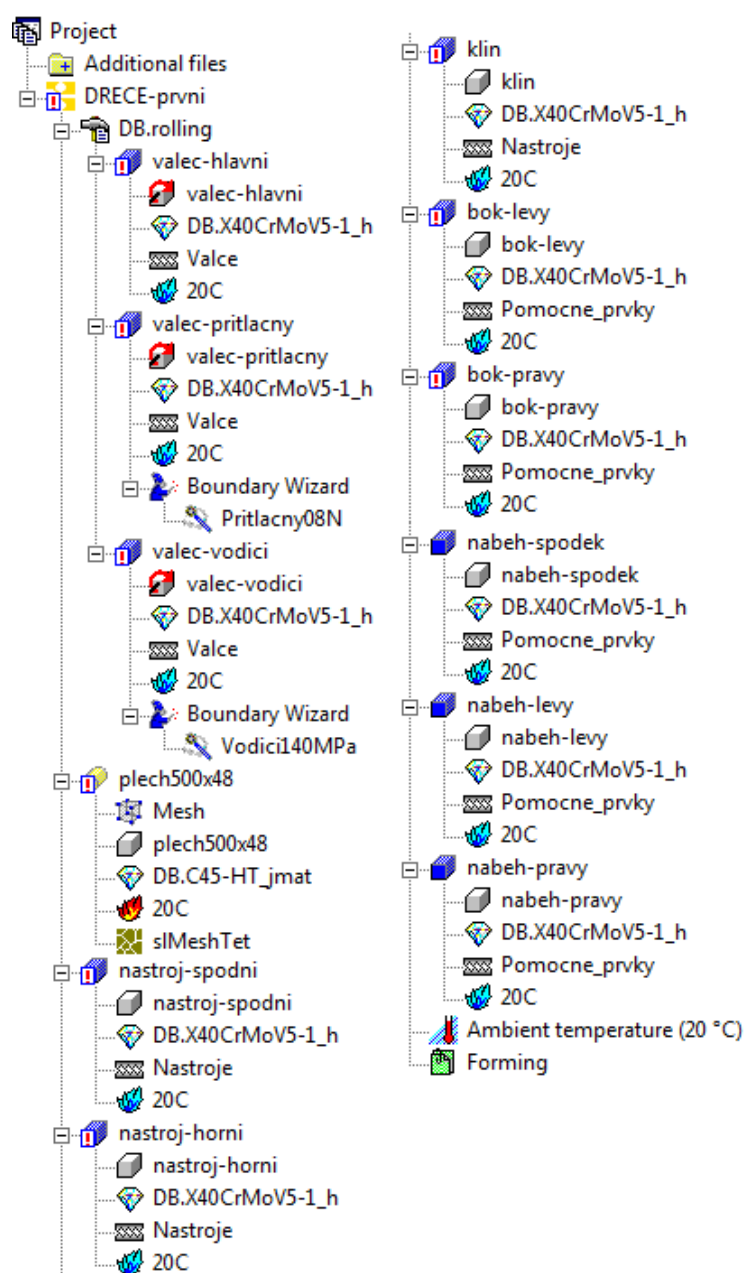
 Mesh → SheetMesh → Element size: 5mm → Create initial mesh → OK

Pokročilejší parametry procesu

Pro definování pokročilých parametrů používáme menu „Forming”, která se nachází na konci stromu. Postupně zadáváme tyto okrajové podmínky procesu:

- Output division → Equal division → Workpiece/die: 110
- *Output results → Strain hardening; Total strain tensor; Accumulated plastic strain*
- *Step control → manual → Fixed time step: 1200*
- *Parallel → Multiple threading: Number of threads ... dle možnosti PC (jedno vlákno nechat pro běh systému)*
- *Solver → Multifrontal Sparse (2D/3D)*
- *Contact → Tolerance 0,02mm; Bias 0; Separation type – Stress 1.0e-10 MPa; Release within increment; Several releases/increments 99*
- *Friction → Manual; Arctan 0.001; Friction heat conversion factor 0.9*
- *Stabilizer → 100 N/mm*
- *Miscellaneous option → Temperature effect*

Sestavený stromu procesu

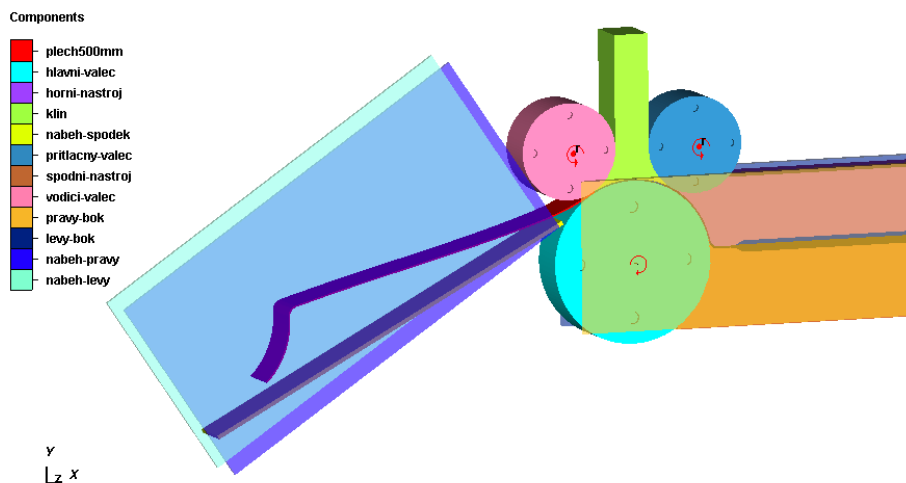


Spuštění simulace



→ Ano → Start analysis

Nastavení opakování průchodu



Geometrie

Insert → Geometry → From result → Process: DRECE-prvni, 100% Process time

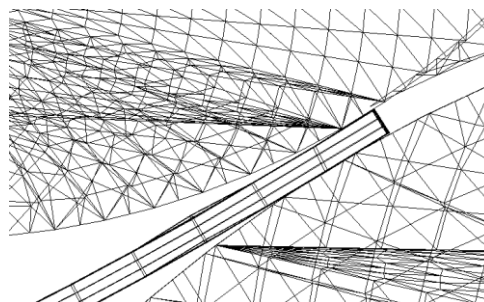
Nový strom procesu

Zkopírujeme předchozí proces bez výsledků.

Process → Copy → Copy without results → pojmenujeme DRECE-druhy

Původní geometrii plechu odmažeme a vložíme na její místo vytvořenou geometrii upraveného plechu z Inventáře. Dojde k umístění geometrie plechu do polohy, kde byl proces ukončen.

Pomocí manipulace s geometrií otočíme vzorek o 180° kolem osy X, a následně provedeme pomocí pohybu geometrie umístění vzorku mezi válce.



Příloha B - Tvorba projektu pro svařování plechu zpracovaného pomocí DRECE zařízení v programu Simufact.welding 4.0

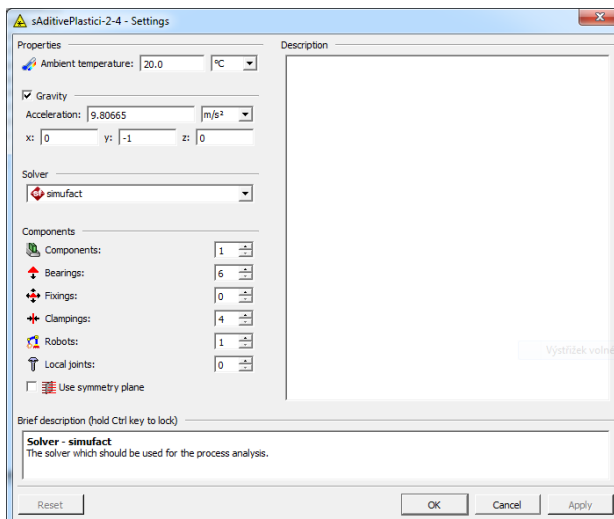
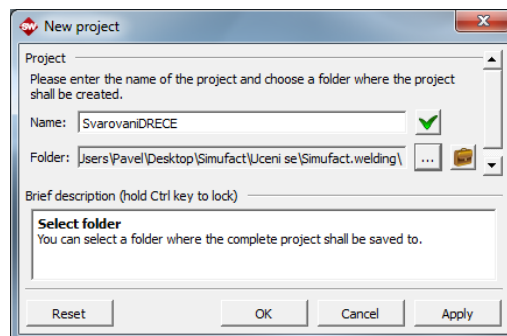
Sestavení modelu

Project → New → Pojmenujeme a vybereme cílovou složku → OK

V nastavení procesu zvolíme tyto údaje:


- Teplota okolí 20°C
- Gravitace ve směru osy y: -1, zrychlení $9,80665\text{m.s}^{-2}$
- Typ řešitele: simufact
- Components (počet svařovaných částí): 1
- Bearings (stoly): 6
- Clampings (svorky): 4
- Robots (svařovací zařízení): 1

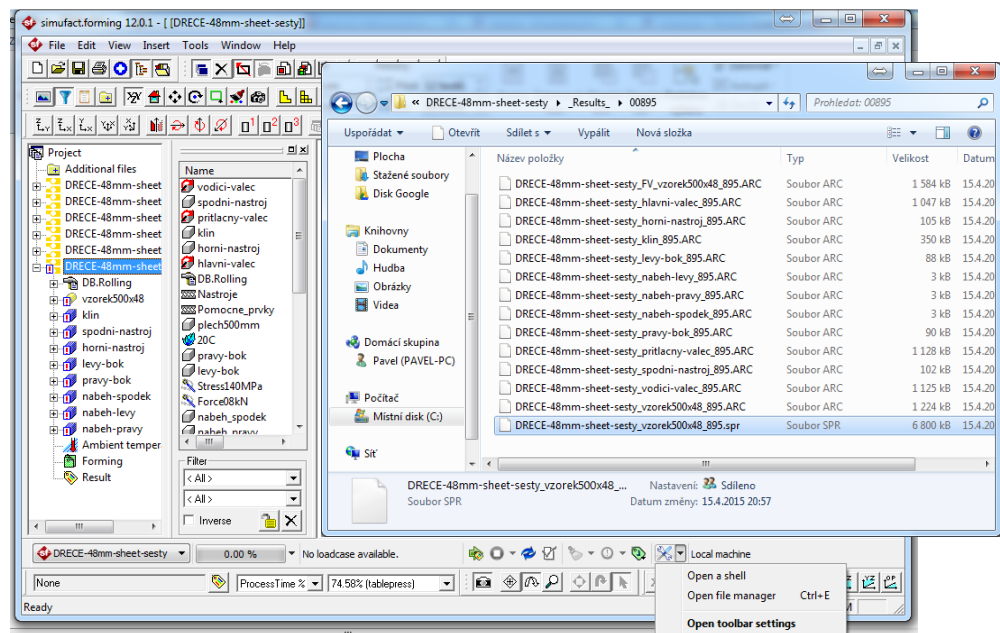
Po zadání údajů → OK




Vložení geometrie zpracovaného plechu

Vyhledání souboru geometrie plechu obsahující i změny v materiálových vlastnostech, je nejrychlejší vyhledat ve výchozím programu Simufact.forming. Pro jeho vyhledání je nejjednodušší použít příkaz „Open file manager“ nebo stisknutí Ctrl + E. Toto tlačítko se nachází na liště analýz.

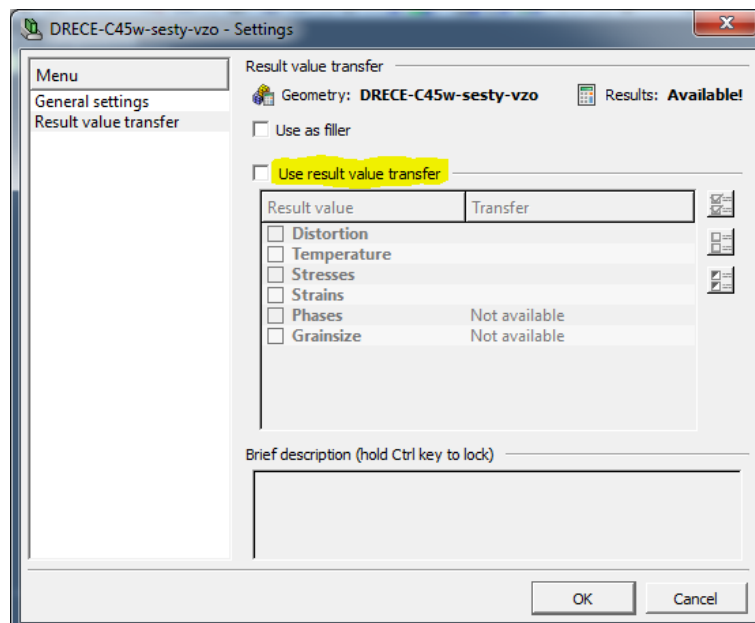
Označení posledního průchodu ve stromu procesu  → → Open File Manager → _Result_ → složka posledního kroku → soubor .SPR



Tento soubor přetáhneme do katalogu geometrií v Simufact.welding. U vložené geometrie by se měla objevit ikona  oznamující, že soubor obsahuje zdroje dat předchozích simulací.

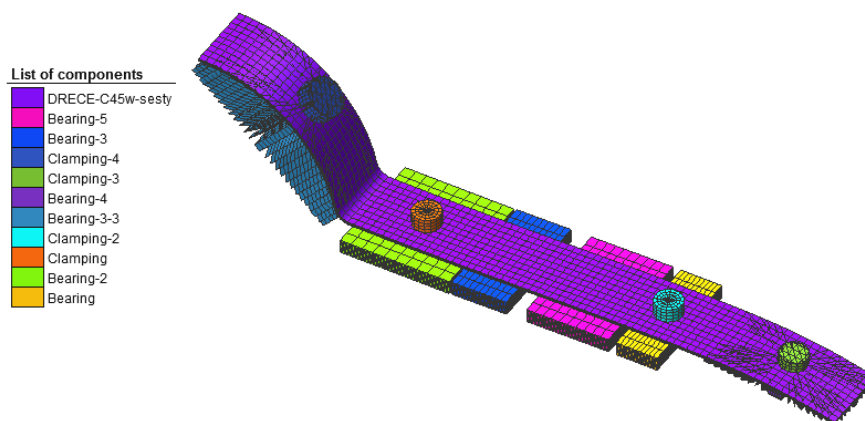
Soubor přiřadíme do prvku „Component“ ve stromě procesu. Pokud budeme chtít provést pouze kalibraci svařovacího zdroje, je nutné odznačit převod výsledků do simulací.

PTM na plech ve stromu procesu → Configure → Odznačit „Use result value transfer“



Ustavení svařence pomocnými prvky

Pro ustavení plechu je nutné použít kvůli deformaci plechu více stolů a více svěrek pro zachycení vznikajících sil.

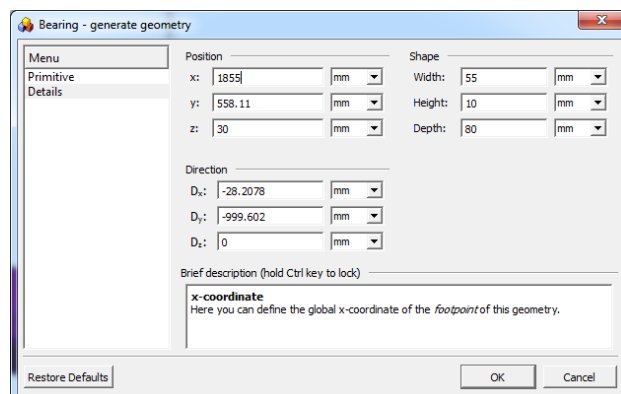


Podpěry – Bearing

Podpěry v okolí svaru nesmí mít vytvořeny se zapnutou funkcí „Fit to selected face“. Tato funkce se použije pouze u podpěr na konci plechu.

PTM na Bearing ve stromu procesu → Generate geometry → Select location → zvolíme umístění na spodní ploše plechu → a zadáme následující parametry:

- Type: Cuboid (kvádr)
- Weidth (šířka): libovolná
v závislosti na zakřivení plochy
- Height (výška): 10 mm
- Depth (hloubka): 80 mm
- Position z (pozice v ose z): 30 mm
- Direction D_z (směr v ose z): 0 mm



Svěrky - Clamping

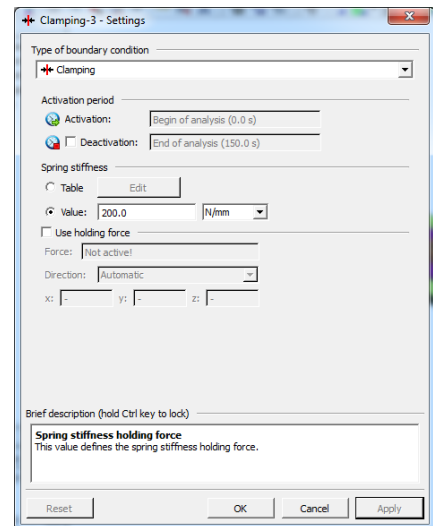
Svěrky jsou umístěny ve vzdálenosti přibližně 90 mm od osy svaru

PTM na Clamping ve stromu procesu → Generate geometry → Select location → zvolíme umístění na horní ploše plechu → a zadáme následující parametry:

- Type: Cylinder (válec)
- Radius: 10 mm
- Height (výška): 10 mm
- Position z (pozice v ose z): 30 mm
- Direction D_z (vychýlení ve směru v ose z): 0 mm



Volba síly a tuhosti upnutí:

PTM na Clamping ve stromu procesu → Configure
→ Spring stiffenss 200 N/mm → OK





Trajektorie

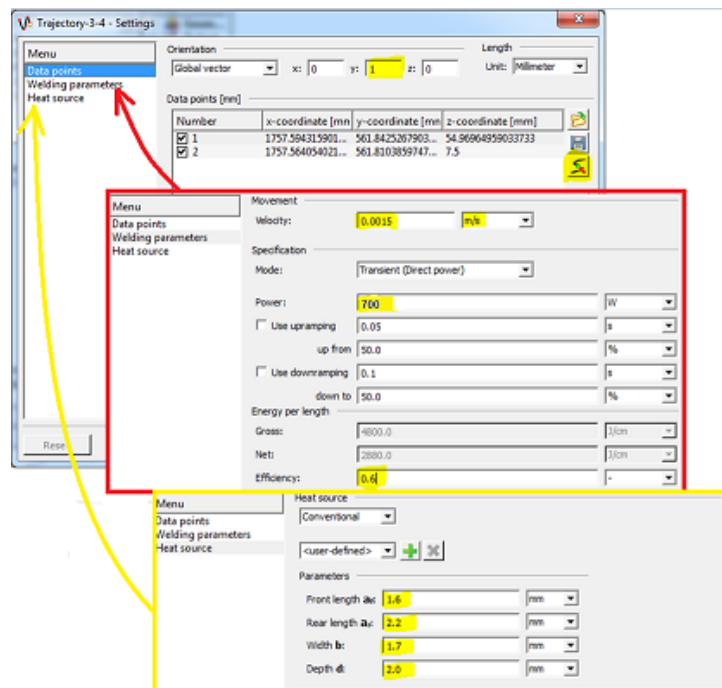
Výběr uzlů pro trajektorii

PTM na  Sets v katalogu →  New node sets → pomocí Ctrl vybereme dva body na horní straně plechu → Apply changes to node set → můžeme přejmenovat vytvořenou soustavu bodů

Definování trajektorie

PTM na  Trajectories v katalogu →  From node set... → a zadáme:

- Data points - orientace zdroje: x: 0 y: 1 z: 0
- Welding parameters – rychlost: 1,5 mm/s, mód: Transient (Direct power), výkon: 700 W, účinnost: 0,6
- Heat source – délka předního oblouku elipsoidy: 1,6 mm, délka zadního oblouku elipsoidy: 2,2 mm, šířka: 1,65 mm, hloubka: 2 mm



✚ Definice materiálu pro svařence a přídavný materiál

Materiál vybereme z knihovny materiálu:

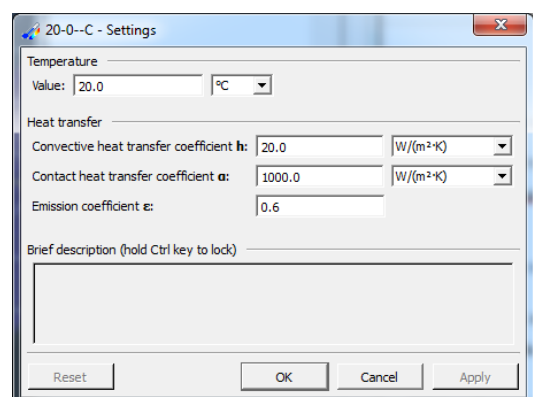
PTM na Materials → *from library* → zvolíme jeden z materiálů vhodných pro svařování
→ OK

✚ Definice tepelné výměny

Výchozí nastavení teplotní výměny bylo přidáno k prvkům již při prvním kroku sestavení modelu. Pokud bychom chtěli přidat nebo upravit nastavení je sled operací následující.

PTM na Temperature → *New* → *Zadáme parametry tepelné výměny* → OK

V tomto příkladu jsou ponechány výchozí hodnoty.

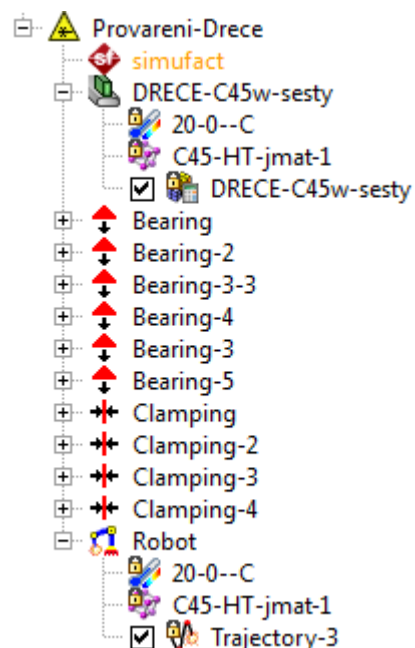


Vložení prvků do stromu procesu

Přiřazení prvků se provádí přetažením prvků z katalogu k odpovídajícím položkám ve stromu procesu. Proces by měl po sestavení vypadat dle obrázku vpravo.

Nastavení časování a umístění středu zdroje

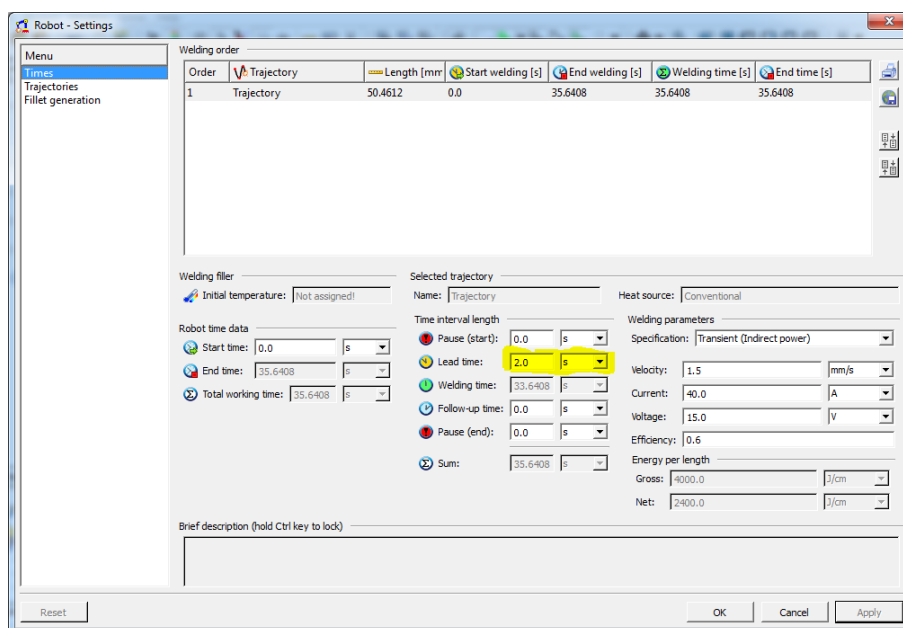
Dvojitým kliknutím na prvek „Robot“ ve stromu procesu se otevře nabídka pro nastavení časování vedení zdroje tepla, jeho umístění a definování svarových housenek.



Nastavení časování

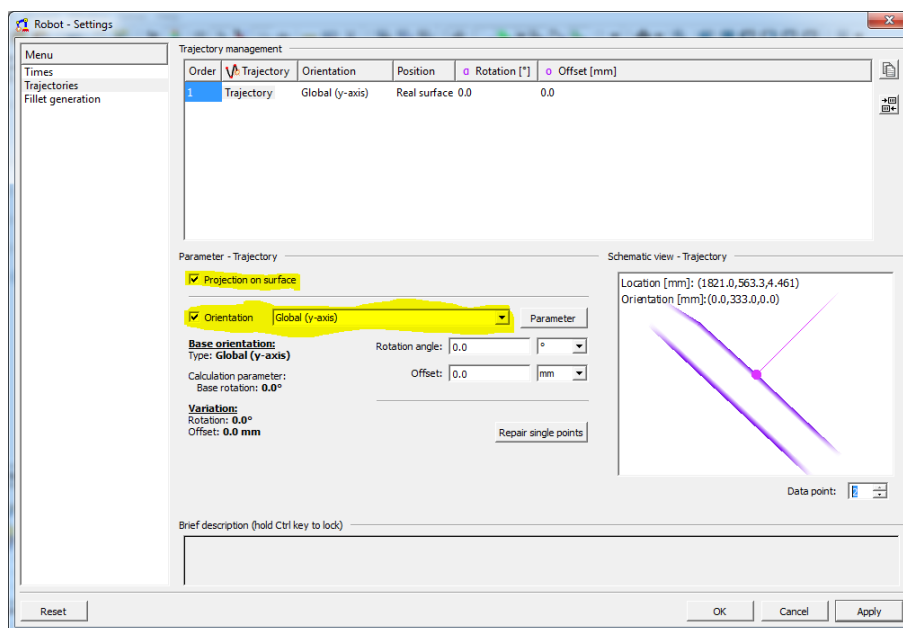
Nahřátí materiálu na hraně plechu pro zajištění průvaru na začátku trajektorie nastavíme:

Robot → *Times* - *Lead time: 2s*



Umístění středu zdroje tepla

Robot → Trajectories – Projection on surface, Orientation: Global (y-axis) → OK



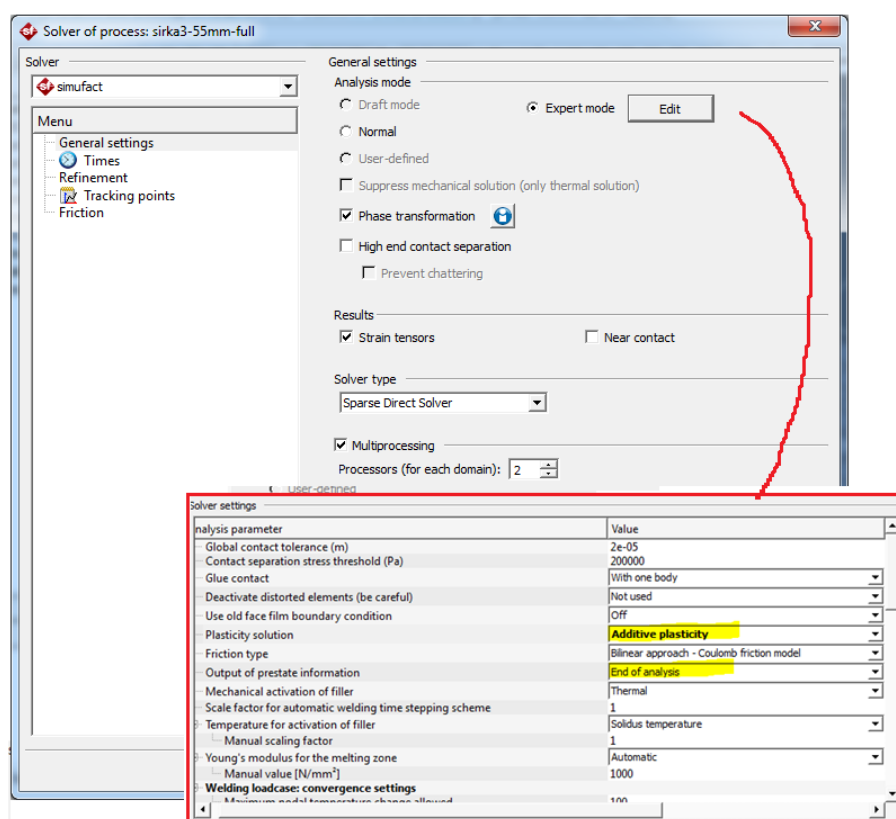
Hlavní nastavení

Pro správné převedení výsledků z předchozích simulací je nutné zvolit v nabídce hlavního nastavení „Expert mode“ a změnit výchozí nastavení řešení plasticity na „Additive plasticity“ a zdroj přenášených informací na „End of analysis“.

Simufact ve stromu procesu → General settings → Expert mode → Edit →

Plasticity solution: Additive plasticity

Output of prestate information: End of analysis



Dále zvolíme počet jader procesoru určených pro výpočet simulace a typ řešitele.

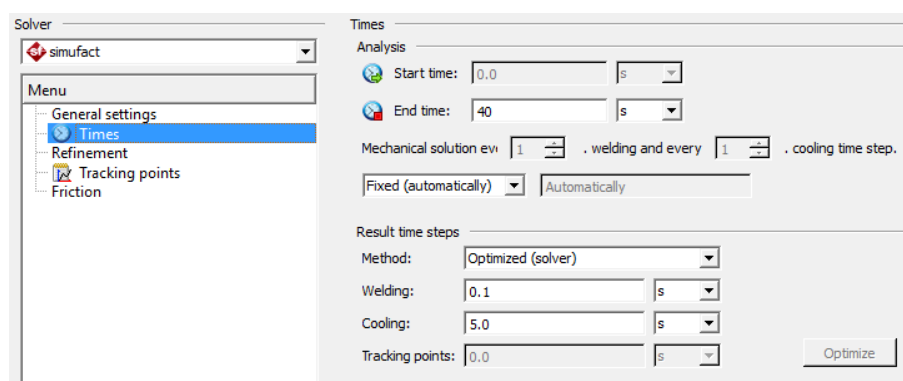
Program dovoluje počítání pouze teplotní analýzy (vhodné pro kalibraci zdroje) nebo teplotně-mechanické analýzy. Pro volbu kalibrace zdroje volíme „*Suppress mechanical solution (only thermal solution)*“ pokud chceme provést kompletní termo-mechanickou analýzu, necháme toto tlačítko nezaškrtnuté a vybereme analýzu požadovaných vlastností (změny fází, nastavení kontaktu, tenzor deformace...)

Volba požadovaných výsledků je závislá na vložené geometrii. Pro teplotně-mechanickou analýzu je nutné zvolit i přenos dat z předešlých simulací. Postup je popsán v kapitole Geometrie zpracovaného plechu.

Časování

Pro kalibraci zdroje stačí zvolit minimální délku výpočtu dle času svařování, pro kompletní teplotně - mechanickou analýzu je nutné prodloužit analýzu z důvodu ochlazování součástí.

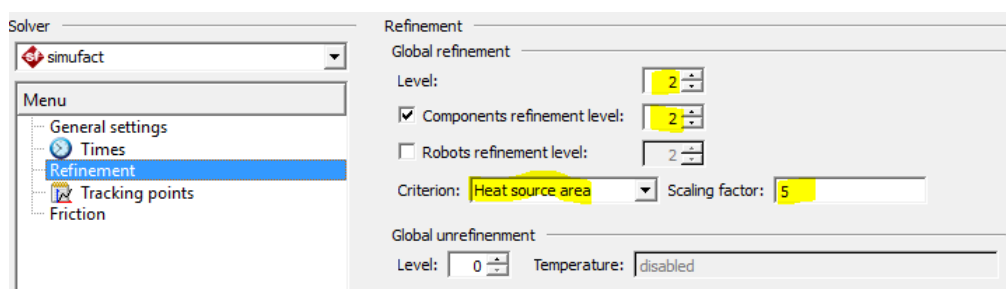
Simufact ve stromu procesu → Times → End time 40 s, Fixed (automatically), Result time step: Method – Optimized (solver)



Zjemnění sítě

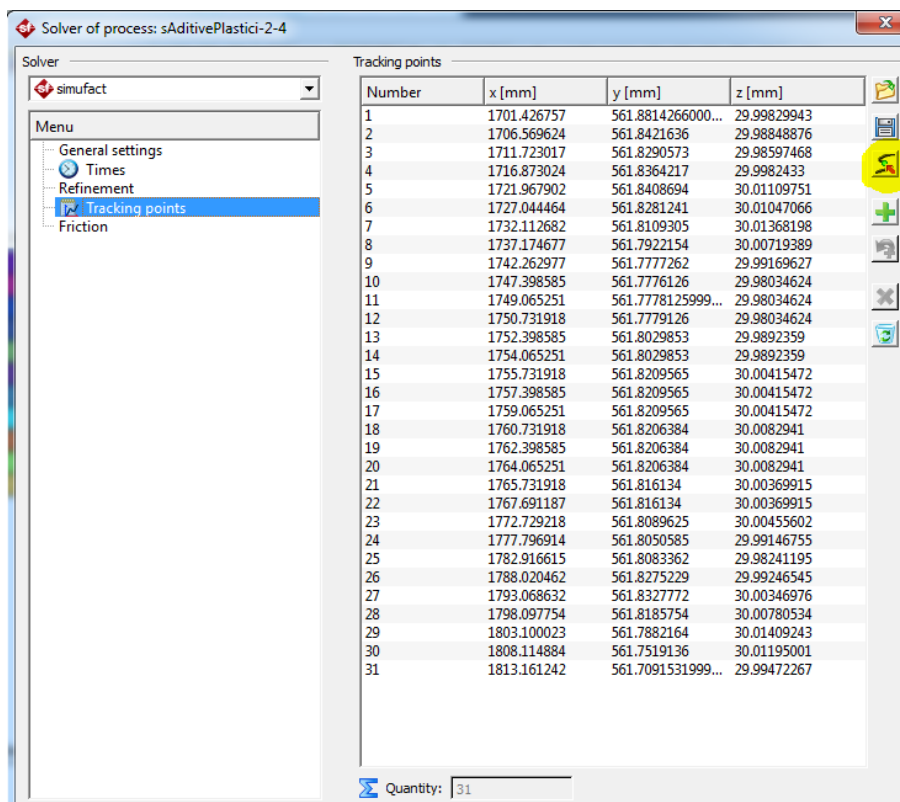
Zjemnění sítě je důležité pro zvýšení přesnosti získaných dat. Jemnost by měla klesat současně se vzdáleností od osy svaru.

Simufact ve stromu procesu → Refinement → Global refinement level: 2, Components refinement level 2, Scaling factor: 5



Měřené body

Slouží pro vykreslení závislosti teplotních a mechanických hodnot v průběhu svařování. Pro definování jejich umístění slouží nástroj „Node set“ popsaný v kapitole Trajektorie.



Number	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1	1701.426757	561.8814266000...	29.99829943
2	1706.569624	561.8421636	29.98848876
3	1711.723017	561.8290573	29.98597468
4	1716.873024	561.8364217	29.9882433
5	1721.967902	561.8408694	30.01109751
6	1727.044464	561.8281241	30.01047066
7	1732.112682	561.8109305	30.01368198
8	1737.174677	561.7922154	30.00719389
9	1742.262977	561.7777262	29.99169627
10	1747.398585	561.7776126	29.98034624
11	1749.065251	561.7778125999...	29.98034624
12	1750.731918	561.7779126	29.98034624
13	1752.398585	561.8029853	29.98923359
14	1754.065251	561.8029853	29.98923359
15	1755.731918	561.8209565	30.00415472
16	1757.398585	561.8209565	30.00415472
17	1759.065251	561.8209565	30.00415472
18	1760.731918	561.8206384	30.0082941
19	1762.398585	561.8206384	30.0082941
20	1764.065251	561.8206384	30.0082941
21	1765.731918	561.816134	30.00369915
22	1767.691187	561.816134	30.00369915
23	1772.729218	561.8089625	30.00455602
24	1777.796914	561.8050585	29.99146755
25	1782.916615	561.8083362	29.98241195
26	1788.020462	561.8275229	29.99246545
27	1793.068632	561.8327772	30.00346976
28	1798.097754	561.8185754	30.00780534
29	1803.100023	561.7882164	30.01409243
30	1808.114884	561.7519136	30.01195001
31	1813.161242	561.7091531999...	29.99472267

Spuštění simulace



→ Ano → Start analysis